

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Métodos de Redução de Ordem Aplicados a Sistemas de Potência

Dissertação submetida como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

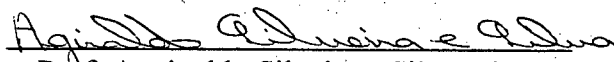
David Emilio Ismael Rojas

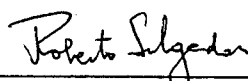
FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 1994

MÉTODOS DE REDUÇÃO DE ORDEM
APLICADOS A SISTEMAS DE POTÊNCIA

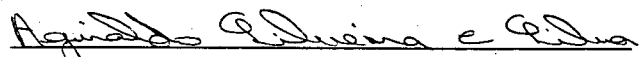
David Emilio Ismael Rojas

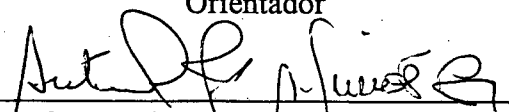
'Esta dissertação foi julgada para a obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Elétrica,
Área de Concentração em Sistema de Potência,
e aprovada em sua forma final pelo Curso de Pós-Graduação '

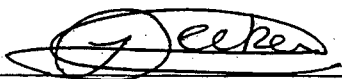

Prof. Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D
Orientador

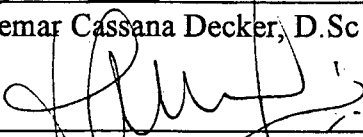

Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D
Coordenador do Curso

Banca Examinadora


Prof. Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D - Presidente
Orientador


Prof. Antonio J. A. Simões Costa, Ph.D


Prof. Ildemar Cassana Decker, D.Sc


Prof. Edson R. De Pieri, Dr.

Aos meus pais
À minha esposa Zulema e
meus filhos Jeremy I. e David A.

Agradecimentos

Não considero concluído este trabalho senão incluir esta folha, que me permite expressar os meus agradecimentos a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para o seu desenvolvimento, especialmente:

Ao professor Aguinaldo Silveira e Silva, meu agradecimento especial pela amizade e inestimável ajuda prestada na orientação deste trabalho.

Aos professores e colegas da Pós-Graduação que de uma, ou de outra forma, contribuíram com incentivo e amizade.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro.

À Universidade Federal de Santa Catarina pelo apoio técnico.

Aos colegas Flavio Becon, Alexandro Manzoni e Alexandre Perin, que sob diversas formas contribuíram para o desenvolvimento do trabalho.

E, finalmente, agradeço ao Criador do Universo pela certeza da concretização deste trabalho.

RESUMO

A ordem elevada de sistemas de grande porte pode dificultar o projeto de controladores. Este problema incentivou várias pesquisas durante os últimos anos, sendo propostos uma ampla variedade de métodos para substituir estes modelos de ordem elevada por modelos equivalentes de ordem bem mais reduzida.

A presente dissertação considera quatro métodos de identificação/redução de ordem de sistemas dinâmicos. Estes métodos são aplicados à redução de ordem de sistemas elétricos de potência. Objetiva-se através destes métodos facilitar o projeto de controladores em sistemas de potência, especialmente nos sistemas de grande porte.

Avaliam-se ainda as vantagens e limitações de cada método analisado, através da aplicação para dois sistemas de potência.

Os modelos equivalentes para o primeiro sistema teste foram obtidos pelos quatro métodos analisados (Prony, Moore, Hankel e Levy). No entanto, para o segundo sistema teste são obtidos somente os modelos equivalentes através de dois métodos analisados (Prony e Levy). Estes modelos equivalentes são utilizados no projeto de estabilizadores de sistemas de potência. O método de projeto usado é baseado no lugar das raízes. A validação dos modelos equivalentes é realizada aplicando-se os estabilizadores projetados aos sistemas de potência originais e verificando-se a estabilidade dos sistemas através de simulação computacional.

Os programas desenvolvidos nesta dissertação são genéricos, podendo ser aplicados a sistemas dinâmicos em geral, e portanto a outras áreas da engenharia, onde são derivados modelos lineares que representam algum processo dinâmico, e de ordem elevada. Estes programas são descritos resumidamente nos apêndices.

ABSTRACT

The high order of large scale systems can cause difficulties for the design of controllers. Several methods for order reduction have been proposed in the last few years aiming at providing equivalent models of low order.

This work considers four methods for identification/order reduction for dynamical systems. These methods are applied to reduce the order of power system models. The aim is to provide tools to facilitate the design of power system controllers.

The advantages and limitations of the proposed methods are evaluated by the application to two power systems. The design method is based on the root locus. The reduced order models are validated by the application of the designed controllers to the original system.

The programs developed in this work are generic, in the sense that they can be applied to any dynamical system and therefore to other engineering fields where large order models occur. These programs are described in the appendices.

Nomenclatura

| | |
|-----------------------------------|---|
| RAT | Regulador Automático de Tensão |
| ESP | Estabilizador de Sistemas de Potência |
| $\lambda_i(A)$ | i -ésimo autovalor de A |
| p_i | i -ésimo autovetor à direita |
| q_i | i -ésimo autovetor à esquerda |
| \tilde{B}_i | i -ésimo resíduo do sinal. |
| R_i | Matriz resíduo da função de transferência ($R_i = p_i q_i'$) |
| $G(s)$ | Função de transferência no plano s |
| $\hat{G}(s)$ | Função de transferência de ordem reduzida no plano s |
| P | Gramiano de controlabilidade |
| Q | Gramiano de observabilidade |
| A^* | Matriz conjugada complexa da transposta de A |
| R | Matriz triangular superior ($Q = RR^*$ por Cholesky) |
| $\sigma_i(G(s))$ | i -ésimo valor singular de Hankel. Definição 3.3.2.1 |
| $\ln(A)$ | Índice da matriz A |
| $\pi(A)$ | Número de autovalores de A , no plano direito aberto. |
| $\gamma(A)$ | Número de autovalores de A , no plano esquerdo aberto. |
| $\partial(A)$ | Número de autovalores de A no eixo imaginário |
| (A, B, C, D) | Realização do espaço de estado. |
| (A_b, B_b, C_b, D_b) | Realização balanceada. |
| $\ G(s)\ _{\mathcal{H}}$ | Norma de Hankel para $G(s)$ |
| $G(j\omega)$ | Função de transferência, dependente da frequência |
| sup | Supremo |
| inf | Ínfimo |
| $\varepsilon(j\omega)$ | Representação do erro. $\varepsilon(j\omega) = F(j\omega) - G(j\omega)$ |
| $\frac{\partial E}{\partial A_i}$ | Derivada parcial de E em relação à i -ésima variável A_i |
| $\frac{\partial E}{\partial B_i}$ | Derivada parcial de E em relação à i -ésima variável B_i |

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| AGRADECIMENTOS | III |
| RESUMO | IV |
| ABSTRACT | V |
| NOMENCLATURA | VI |
| 1 INTRODUÇÃO | 01 |
| 2 ESTABILIDADE | |
| 2.1 Introdução | 04 |
| 2.2 Estabilidade de um sistema de potência | 05 |
| 2.2.1 Estabilidade transitória | 05 |
| 2.2.2 Estabilidade dinâmica | 06 |
| 2.3 Estabilizadores de sistemas de potência | 08 |
| 2.3.1 Compensação de Fase | 09 |
| 2.3.2 Washout | 10 |
| 2.3.3 Ganho | 10 |
| 2.3.4 Localização do ESP | 11 |
| 2.5 Conclusões | 14 |
| 3 MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DE EQUIVALENTES | |
| 3.1 Introdução | 15 |
| 3.2 Método de Prony | 17 |
| 3.2.1 Introdução | 17 |
| 3.2.2 Processo de identificação de modelos | 17 |

| | | |
|---------|--|----|
| 3.2.3 | Base matemática do método de Prony | 18 |
| 3.2.3.1 | Modelagem do sistema | 19 |
| 3.2.3.2 | Obtenção da função de transferência | 23 |
| 3.2.3.3 | Desenvolvimento do método | 27 |
| 3.2.4 | Resumo dos passos do algoritmo | 30 |
| 3.2.5 | Avaliação do método | 31 |
| 3.2.5.1 | Exigências do método | 32 |
| 3.3 | Método da norma ótima de Hankel - Moore para sistemas multivariáveis | 33 |
| 3.3.1 | Introdução | 33 |
| 3.3.2 | Definição do problema | 34 |
| 3.3.2.1 | Definição dos valores singulares de Hankel | 35 |
| 3.3.2.2 | Definição da norma Hankel | 36 |
| 3.3.2.3 | O problema | 40 |
| 3.3.3 | Avaliação do método de Moore | 46 |
| 3.3.3.1 | Importância da frequência na representação balanceada e no modelo reduzido | 47 |
| 3.3.3.2 | Avaliação do método da mínima norma de Hankel | 48 |
| 3.3.3.4 | Comentários | 49 |
| 3.4 | Método de Levy | 49 |
| 3.4.1 | Introdução | 49 |
| 3.4.2 | Dedução do método | 50 |
| 3.4.3 | Avaliação do método | 56 |
| 3.4.3.1 | Exigências do método | 56 |
| 3.5 | Conclusões | 57 |

4 APLICAÇÃO DOS MODELOS EQUIVALENTES NO PROJETO DE ESP's

| | | |
|---------|-----------------------------------|----|
| 4.1 | Introdução | 58 |
| 4.2 | Aplicações a sistemas de potência | 59 |
| 4.2.1 | Sistema 1 | 60 |
| 4.2.1.1 | Projeto do ESP para o sistema 1 | 78 |
| 4.2.2 | Sistema 2 | 84 |
| 4.2.2.1 | Projeto de ESP's para o sistema 2 | 87 |
| 4.3 | Conclusão | 90 |

5 CONCLUSÕES

| | |
|-------------------------------|-----|
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 96 |
| APÊNDICE A DADOS DOS SISTEMAS | 102 |
| APÊNDICE B PROGRAMAS | 113 |

Capítulo 1

Introdução

Uma forma de instabilidade que ocorria já com os primeiros sistemas de potência interligados, é a perda de sincronismo entre geradores causada pela falta de torque de sincronização. Este tipo de instabilidade resulta de grandes perturbações no sistema, onde as não-linearidades do sistema são importantes. Com o uso dos reguladores automáticos de tensão, operando através da excitação dos geradores, conseguiu-se incrementar os torques de sincronização. No entanto, o uso de reguladores rápidos com alto ganho trouxe alguns efeitos indesejáveis, sendo o principal deles a diminuição dos torques de amortecimento natural das máquinas síncronas [1,2]. Por esta razão, torna-se necessário a inclusão de sinais estabilizadores. Quando os sistemas de potência são de grande porte ou com características desconhecidas, o projeto dos estabilizadores torna-se difícil. Nos últimos anos têm sido demonstrada uma grande preocupação com o tratamento de redução de ordem de sistemas de potência de grande porte. A redução de ordem, que será tratada neste trabalho, constitui uma das maneiras para simplificar o projeto de estabilizadores para estes sistemas.

O objetivo dos métodos de redução de ordem é a obtenção de um modelo equivalente com dimensão inferior à do modelo original que representa o comportamento dinâmico aproximadamente do sistema.

Diversas razões levam a efetuar tais reduções, como por exemplo, diminuir o tempo e o esforço computacional, facilitar o projeto de controladores para sistemas de potência, especialmente aqueles de grande porte, etc. Existe na literatura uma grande variedade de métodos de redução de ordem, utilizando diferentes algoritmos; a idéia inicial talvez se deva a Prony (1795) [5], sendo que este método não é destinado diretamente a redução de ordem de um sistema, já que sua função principal é a identificação de um sinal. No entanto pode-se aproveitar o método para obter um modelo de ordem reduzida do sistema.

Este trabalho objetiva avaliar alguns métodos que permitem a identificação dos parâmetros de funções de transferência, de modo a permitir a substituição dos modelos originais por modelos equivalentes de ordem bem mais reduzida, sem incorrer em muitos erros. Com esta finalidade são considerados os seguintes métodos:

- Método de Moore
- Método de Prony
- Método da mínima norma de Hankel
- Método de Levy

O método de Levy é um dos mais tradicionais e antigos no uso de redução da ordem, sendo incluído neste trabalho com a finalidade de comparação com os demais métodos.

Na parte final do trabalho são avaliados os métodos estudados, utilizando-os no projeto de estabilizadores de sistemas de potência (ESP's). São apresentados também os resultados da aplicação a dois sistemas elétricos.

No decorrer deste trabalho algumas contribuições foram feitas, em especial propor o uso do método de Moore para a construção de equivalentes dinâmicos de sistemas de potência e sua aplicação ao projeto de ESP's.

Vale ressaltar que embora os métodos de redução de ordem estejam sendo propostos para o projeto de ESP's, eles podem ser usados para o projeto de outros controladores em sistemas de potência (FACTS - Flexible Alternate Current Transmission, etc) [7,8,9].

A estrutura do presente trabalho é delineada a seguir. No capítulo 2 apresenta-se o problema da estabilidade de sistemas de potência com ênfase na estabilidade dinâmica. O uso de estabilizador de sistemas de potência (ESP), e algumas técnicas de projeto são discutidas.

Os métodos de redução de ordem considerados no presente trabalho são apresentados no capítulo 3. Uma avaliação destes métodos e requisitos para sua implementação também são apresentados.

O capítulo 4 trata da aplicação das técnicas de redução de ordem analisadas no capítulo 3. A aplicação escolhida permite projetar ESP's para alguns sistemas de potência selecionados. Os resultados conseguidos através das técnicas consideradas são apresentados em forma comparativa.

O capítulo 5, apresenta um resumo do trabalho, destacando-se os resultados obtidos e ainda sugestões para futuras pesquisas.

Na parte final do trabalho encontram-se os apêndices contendo dados dos exemplos considerados, resultados, diagramas, etc.

Capítulo 2

Estabilidade

2.1 Introdução

Os primeiros sistemas de potência que entraram em funcionamento consistiam de usinas a carvão ou a óleo, e apenas supriam cargas locais. O principal problema encontrado era a dificuldade em manter a igualdade dos torques elétrico e mecânico, devido a precariedade dos reguladores.

Com o desenvolvimento das usinas hidrelétricas, a energia elétrica deixou de ser gerada apenas para atender cargas locais. Passou-se a abastecer a muitos usuários através de longas linhas de transmissão. Foram construídas linhas de transmissão de alta tensão e extra alta tensão, interligando grandes e pequenas usinas elétricas. Desta maneira conseguiu-se obter maior economia, tornando a transmissão mais confiável.

Com o uso dos Reguladores Automáticos de Tensão (RAT) foi possível estender a região de operação dos geradores, e operar os sistemas de potência de forma mais segura. No entanto, com uso dos reguladores rápidos com alto ganho, surgem efeitos indesejáveis, pois reduzem-se os torques de amortecimento, tornando o sistema mais propenso à instabilidade oscilatória. Com o crescente aumento da demanda, os sistemas de potência começaram a operar perto dos limites de estabilidade, dando margem ao

surgimento de oscilações eletromecânicas, que serão estudadas posteriormente. Isto motivou um grande interesse pelo uso de novas técnicas de operação, procurando atender de forma econômica e segura os consumidores.

Com esta preocupação, o estudo relativo a estabilidade dos sistemas elétricos de potência passou a merecer um maior interesse. A seguir são apresentadas algumas definições sobre estabilidade.

2.2 Estabilidade de um Sistema de Potência

A operação de um sistema de potência é usualmente acompanhada por pequenas flutuações semi-aleatórias de corrente, tensão e potência, e frequentemente por grandes perturbações. O conceito de **estabilidade** relaciona-se à habilidade dos geradores em manter o sincronismo e retornar ao ponto de operação, imediatamente após cessar a perturbação. Dependendo do tipo de perturbação, a estabilidade pode ser classificada em estabilidade transitória e estabilidade dinâmica, conforme descrito a seguir.

2.2.1 Estabilidade Transitória

A estabilidade transitória é definida como a capacidade do sistema de potência de manter o sincronismo após grandes perturbações. Entre estas contingências pode-se citar os curto circuitos, desconexão de linhas, variações de grandes cargas, etc.[14,15]

O critério de áreas iguais pode ser usado para determinar se o sistema é transitoriamente estável, observando-se as curvas de potência contra ângulo para períodos de pré, durante e após a falta. Este método é aplicável para sistemas que podem ser aproximados por uma máquina simples ligada a barra infinita ou uma máquina oscilando contra outra [14,15]. Atualmente, utilizam-se simulações no domínio do tempo e métodos

diretos e híbridos (baseados no segundo método de Lyapunov) para analisar a estabilidade transitória.

2.2.2 Estabilidade Dinâmica

A estabilidade dinâmica refere-se à estabilidade do sistema de potência sujeito a pequenas mudanças na carga ou geração [11,13]. O comportamento dinâmico, na vizinhança do ponto de operação do sistema sujeito a pequenas perturbações, pode ser aproximado por um modelo linear. Isto permite que a análise de autovalores seja utilizada para avaliar a estabilidade do sistema [1]. Este modelo linearizado é formado por um conjunto de equações diferenciais ordinárias de primeira ordem, com coeficientes constantes (equações de estado), do tipo

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \quad (2.2)$$

onde

\mathbf{x} : vetor das variáveis de estado

\mathbf{A} : matriz de estado

\mathbf{B} : matriz de entrada

\mathbf{u} : entradas ao sistema

\mathbf{y} : vetor de saídas do sistema

\mathbf{C} : matriz de saída

\mathbf{D} : matriz de transmissão direta

No caso de um sistema de potência, as equações de estado podem ser obtidas através da formulação do modelo de Heffron-Phillips [13,40]. Por outro lado, sob as hipóteses de controlabilidade e observabilidade do sistema, da teoria clássica da álgebra linear, sabe-se que os autovalores de \mathbf{A} são as raízes da equação característica. Se λ_i

representa o i -ésimo autovalor de A , através da teoria de sistemas lineares pode-se verificar que os termos $e^{\lambda_i t}$ satisfazem a solução da equação de estado, para $u=0$. Estes termos exponenciais são denominados modos de oscilação, ou simplesmente modos. Desta forma, se todos os autovalores tem parte real negativa, isto implica que todos os modos diminuem com o tempo, e o sistema é denominado estável. Por outro lado, se um autovalor tem parte real positiva, o seu modo correspondente aumentará exponencialmente com o tempo, passando eventualmente a dominar o comportamento do sistema. Nestas condições, o sistema é denominado instável. Quando tais valores incluem um autovalor simples com parte imaginária igual a zero, a instabilidade recebe o nome de **monotônica** [38]. Por outro lado, se tais autovalores incluem pares complexos conjugados, com a parte imaginária diferente de zero, a instabilidade recebe o nome de **oscilatória** [38]. Desta maneira o tipo de instabilidade de um sistema de potência pode ser classificada em função do tipo de seus autovalores.

A **instabilidade monotônica** na dinâmica dos sistemas de potência surge devido à falta dos torques sincronizantes entre partes do sistema ou entre uma máquina e o resto do sistema [38,39].

A **instabilidade oscilatória** surge devido à redução dos torques de amortecimento entre partes do sistema ou entre uma máquina e o resto do sistema. Este tipo de instabilidade é essencialmente um fenômeno linear [38,39].

A presença de oscilações associadas às inércias dos geradores síncronos interconectados em um sistema elétrico de potência podem ser citadas como fenômenos que causam este tipo de instabilidade angular. Estas oscilações são conhecidas como oscilações eletromecânicas. Os modos associados estão na faixa das baixas frequências, tipicamente de 0.1 a 2.5 Hz. [6]

Um sistema elétrico de potência, dependendo de seu tamanho, pode ter centenas ou milhares de modos oscilantes. Na análise e controle da estabilidade dinâmica do sistema, são reconhecidos geralmente três tipos diferentes de oscilações. O primeiro tipo refere-se à oscilação de uma unidade geradora com respeito ao resto do sistema de

potência. Tais oscilações são denominadas como "modos locais de oscilação". As frequências destas oscilações encontram-se na faixa de 0.8 a 2.0 Hz.

O segundo tipo, refere-se à oscilação de um grupo de máquinas numa parte do sistema contra outras máquinas de outras regiões do sistema. Estas oscilações são denominadas como "modos oscilatórios interáreas". As frequências destas oscilações encontram-se na faixa de 0.1 a 0.7 Hz.

O terceiro tipo, refere-se às oscilações entre unidades de uma mesma usina. Estas são denominadas como "modos de oscilação intra-planta". As frequências destas oscilações encontram-se na faixa de 1.5 a 2.5 Hz.

Para os estudos da estabilidade dinâmica, é essencial avaliar as oscilações eletromecânicas, amortecendo-as através de diferentes controladores.

Este trabalho estuda as técnicas de redução de ordem aplicadas a sistemas elétricos de potência, obtendo-se desta maneira modelos equivalentes que facilitam o projeto dos controladores acima mencionados. Neste trabalho, os modelos equivalentes obtidos através das técnicas de redução de ordem são aplicados ao projeto de estabilizadores de sistemas de potência (ESP's).

Na seção seguinte apresentam-se maiores informações a cerca dos estabilizadores de sistemas de potência.

2.3 Estabilizadores de Sistemas de Potência

Os estabilizadores de sistemas de potência (ESP) são utilizados pela indústria elétrica como um controle adicional, objetivando-se desta forma estender os limites de estabilidade através da modulação da excitação dos geradores. Basicamente, o estabilizador de sistemas de potência proporciona, através do sistema de excitação, uma componente de torque elétrico em fase com as variações de velocidade do rotor, resultando em torque de amortecimento. Na prática isto pode ser conseguido somente para uma certa

faixa de frequências. Desta forma, estes controladores contribuem para o amortecimento das oscilações eletromecânicas [40,41].

Vale salientar que um estabilizador de potência real pode ter como entrada a velocidade do gerador, a tensão terminal, a potência elétrica ou uma combinação destes sinais. A sua saída é um sinal aplicado geralmente ao regulador automático de tensão.

O diagrama de blocos que representa um ESP na forma geral, é mostrado na Figura 2.1.

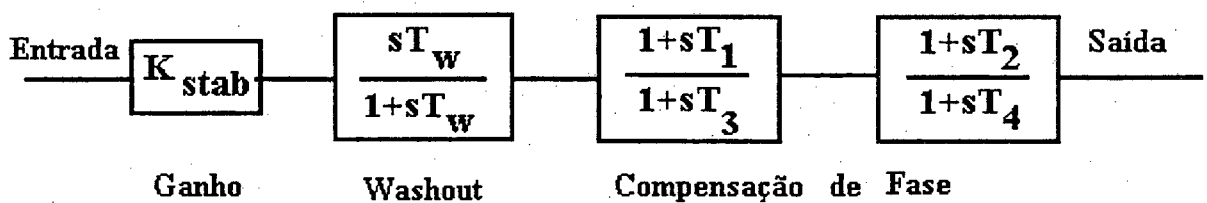


Fig. 2.1 Diagrama de blocos genérico de um ESP

A seguir, apresentam-se as considerações principais para a seleção dos parâmetros do ESP.

2.3.1 Compensação de Fase

Para o caso de um estabilizador que possua a velocidade como entrada, deve ser produzida pelo ESP uma componente de torque elétrico em fase com as variações de velocidade, proporcionando desta maneira o amortecimento requerido. Os blocos correspondentes à compensação de fase devem ser apropriados para compensar o atraso de

fase entre a entrada da excitatriz e o torque elétrico. A característica de fase a ser compensada depende das condições do sistema.

2.3.2 Washout

O "washout", é incluído com a finalidade de evitar que variações constantes de velocidade modifiquem a tensão terminal. O bloco "washout", é um filtro passa alto, cuja característica principal é eliminar sinais dc. O valor da constante de tempo T_w pode variar na faixa de 1 a 20 segundos.

2.3.3 Ganho

O ganho do estabilizador (K_{STAB}) é selecionado através de testes em uma ampla faixa de valores. O ideal é posicionar este ganho num valor correspondente ao máximo amortecimento. No entanto, o ganho geralmente é limitado por outras considerações, como: produzir um amortecimento satisfatório para os modos críticos do sistema sem, entretanto, comprometer a estabilidade dos outros modos ou a estabilidade transitória. Por outro lado, não deve causar uma amplificação excessiva para evitar problemas de ruído e saturação do sinal de saída do ESP.

Algumas aplicações práticas de ESP's requerem adicionalmente filtros que servem para evitar esforços torcionais.

Existem na literatura alguns métodos de projeto de estabilizadores, podendo-se citar o método clássico [13], métodos de posicionamento de pólos (Ex. através do lugar das raízes, etc) [31,32], métodos de resposta em frequência (através dos diagramas de Bode [32], ou através dos diagramas de Nyquist [42], etc). Outro método de destaque para projeto de ESP's é baseado na teoria de controle ótimo com restrições estruturais, permitindo assim a determinação dos controles em sua forma convencional de avanço-atraso de fase [43].

Na referência [48] é proposto um algoritmo sequencial para o ajuste dos parâmetros dos ESP's. Este algoritmo de posicionamento de pólos baseado na referência [49] determina os parâmetros de cada estabilizador sequencialmente de modo que um dado par de modos eletromecânicos seja posicionado numa região do plano complexo s . Mas em um sistema de potência multi-máquinas, onde existem interações entre vários subsistemas, a adição de um estabilizador perturba os autovalores previamente posicionados, o que é alternamente indesejável.

2.3.4 Localização do ESP

Com referência à localização dos ESP's, inicialmente pode-se pensar que eles deverão estar nas máquinas cujas variações de velocidade oscilam com maior magnitude. Logicamente isto é só um requisito, não representando a condição suficiente, já que deve-se considerar também o tamanho das unidades, sendo este, outro fator importante para a localização dos estabilizadores. Esta informação adicional pode ser obtida através da matriz de fatores de participação dos modos [1]. A matriz de participação de fatores de participação é uma combinação dos autovetores esquerdos e direitos, permitindo identificar os estados que têm a maior influência em qualquer modo. Estes fatores são adimensionais. Os fatores de participação representam também a sensibilidade dos autovalores à mudanças nos elementos da diagonal da matriz de estado do sistema. Isto indica que um torque adicional, proporcional à velocidade, aplicado ao rotor destas máquinas, terá um efeito significativo sobre os autovalores. Desta maneira a localização dos estabilizadores deverá ser nas máquinas que tenham os maiores fatores de participação, associados com as variações de velocidade das máquinas.

O esquema de blocos da figura 2.2 mostra a conexão de um ESP, onde a sua saída é um sinal aplicado geralmente ao regulador automático de tensão.

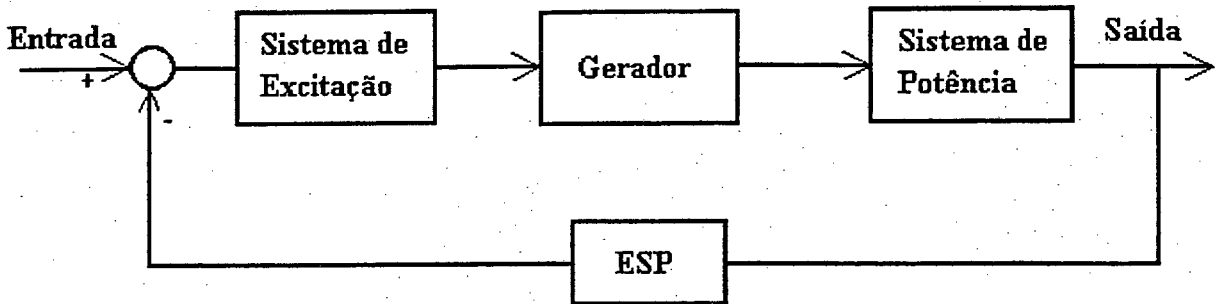


Fig 2.2 Conexão do Estabilizador de Sistemas de Potência

Para um sistema multi-máquinas, no qual por conveniência faz-se a hipótese de que todas as máquinas do sistema são equipadas com estabilizadores de potência, o problema é muito complexo, já que existem interações entre os diferentes modos de oscilação. Considerando-se a velocidade das máquinas como medida de saída, a primeira aproximação deve ser encontrar as funções de transferência ($G_{ij}(s)$, $i, j = 1, \dots, n$) para todo o sistema. Estas operações são realizadas a partir da representação linearizada das equações de estado (2.1 e 2.2), onde a função de transferência é dada por

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (2.3)$$

O conjunto de $n \times n$ funções de transferência resultantes pode ser ordenado como uma matriz de transferência considerando as respectivas relações entre as entradas e as saídas para cada caso, da seguinte forma

$$\begin{pmatrix} \Delta\omega_1 \\ \Delta\omega_2 \\ \vdots \\ \Delta\omega_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & \dots & G_{1n}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & \dots & G_{2n}(s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1}(s) & G_{n2}(s) & \dots & G_{nn}(s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta V_{ref1} \\ \Delta V_{ref2} \\ \vdots \\ \Delta V_{refn} \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

A figura 2.3 mostra o diagrama de blocos para o caso analisado em que todas as máquinas possuem estabilizadores.

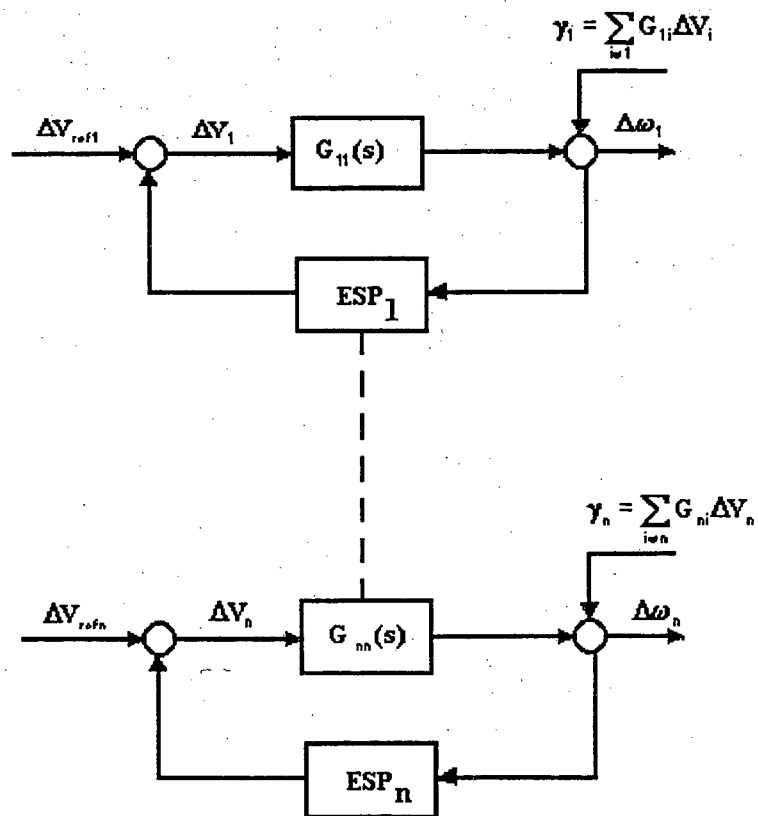


Fig. 2.3 Diagrama de blocos linearizado para um sistema multi-máquinas com ESP's.

2.5 Conclusões

Neste capítulo, é apresentado o problema da estabilidade de um sistema elétrico de potência, dando ênfase ao caso da estabilidade dinâmica. Foi discutido o problema do amortecimento dos modos, que podem tirar de sincronismo um ou mais geradores. Uma possível solução deste problema é o uso de ESP's. Quando o sistema elétrico de potência é de grande porte, o projeto destes ESP's apresenta dificuldades pela quantidade de informação que deve ser considerada. Visando buscar uma solução para este problema, serão abordados, no próximo capítulo, alguns métodos de identificação e/ou redução de ordem, que podem facilitar o projeto dos ESP's e de outros controladores em sistemas multi-máquinas.

Capítulo 3

Métodos para Determinação de Equivalentes

3.1 Introdução

Em muitas áreas da engenharia são derivados modelos lineares que representam algum processo dinâmico. Para muitos processos, estes modelos são de ordem elevada. Este aspecto incentivou várias pesquisas durante os últimos anos, sendo propostos uma ampla variedade de métodos para poder substituir estes modelos de ordem elevada por modelos equivalentes de ordem bem mais reduzida, sem incorrer em muitos erros. A idéia inicial talvez se deva a Prony (1795) [5], existindo atualmente métodos que geralmente são bastante simples computacionalmente, mas que não garantem que a melhor solução tenha sido encontrada.

No caso do setor elétrico, o contínuo crescimento dos sistemas elétricos de potência interligados, resultam em sistemas que incluem muitos geradores e uma grande quantidade de barras. Estes sistemas cobrem uma imensa área geográfica. Estes sistemas são de grande porte, tornando difícil o projeto de controladores.

Considerando do ponto de vista de projeto e não de análise de desempenho, uma razoável aproximação é considerar só um sistema local, chamado

"sistema em estudo". Este inclui um pequeno número de máquinas, consideradas de maior significância, e separadas do resto do sistema. O sistema restante é chamado "sistema externo", podendo ter um grande número de máquinas mas de uma importância secundária para um determinado estudo.

Com as considerações acima mencionadas, torna-se necessário a obtenção de um modelo simplificado, que se aproxime ao comportamento dinâmico do sistema original. Este modelo reduzido deve preservar as características importantes do sistema físico, tais como estabilidade, ganho, e a resposta em algumas faixas de frequência de interesse. Deve-se supor que as características desejadas do modelo reduzido dependem das aplicações específicas, para as quais o modelo é procurado.

As seguintes recomendações são propostas para realizar o processo de aproximação por um modelo equivalente [7]:

- O modelo aproximado não deve ter uma estrutura maior que a necessária para representar o fenômeno a ser observado;
- Deve ser consistente no domínio da frequência;
- Não deve apresentar grandes diferenças em relação ao caso real;
- Os modelos obtidos devem ser consistentes com modelos obtidos através de sinais relacionados com o caso real.

Com as recomendações acima propostas, neste capítulo serão apresentados quatro métodos que permitem determinar os modelos equivalentes, que são:

* MÉTODO DE PRONY

* MÉTODO DE MOORE

* MÉTODO DA MÍNIMA NORMA DE HANKEL

* MÉTODO DE LEVY

3.2 Método de Prony

3.2.1 Introdução

A análise de Prony é uma metodologia que surgiu para estender a análise de Fourier. Ela permite estimar diretamente a frequência de oscilação, magnitude e a fase relacionada com os componentes modais, presentes em um dado sinal. Esta capacidade do método para extrair este tipo de informação pode ser amplamente explorada em diferentes aplicações. No caso específico deste trabalho, o interesse é aplicar esta metodologia de identificação de sinais, na identificação da função de transferência para sistemas de potência.

A técnica para aproximar um determinado conjunto de dados no tempo por uma função exponencial foi proposta por G.R.B. Prony no ano de 1795 [5]. Posteriormente, esta técnica foi adaptada para aproximar modelos na forma de pólos e resíduos, o que permite a elaboração de modelos equivalentes, e geralmente de ordem mais reduzida que o sistema original. Isto torna possível usar o método em aplicações de grande porte, como por exemplo em sistemas de potência, para permitir aproximar sua função de transferência, como dito anteriormente.

3.2.2 Processo de Identificação de Modelos

O processo a ser seguido para a identificação de sistemas consiste de um processo matemático relativamente simples. Fundamentalmente deve-se considerar que o sistema a ser identificado possa proporcionar uma quantidade compacta de medidas no tempo. Com estas amostras é possível reproduzir em forma conveniente uma curva bastante

aproximada do caso real, embora o modelo identificado possa conter alguns elementos estranhos, que só servem para melhorar a aproximação.

A seguir, apresenta-se a base matemática do método de Prony, que permite a identificação de sinais. Também apresenta-se a forma através da qual o método de Prony foi modificado para permitir a identificação de funções de transferência.

3.2.3 Base Matemática do Método de Prony

A análise de Prony, como foi dito anteriormente, é uma metodologia que estende a análise de Fourier para estimação direta da frequência, amortecimento, magnitude e fase relativa dos componentes modais presentes em um sinal. Através deste método, é possível estimar diretamente, por meio de um conjunto de amostras para a saída $y(t)$, os termos exponenciais de uma função representada convenientemente pela seguinte equação:

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^Q A_i e^{\sigma_i t} \cos(2\pi f_i t + \phi_i) \quad (3.1)$$

Escrevendo a equação anterior na forma exponencial, têm-se:

$$y(t) = \sum_{i=1}^P \tilde{B}_i e^{\lambda_i t} \quad (3.2)$$

O processo para obter a solução via Prony pode ser resumido nos seguintes passos:

- **PASSO 1:** Construir um modelo linear estimado a partir de um conjunto de amostras uniformemente espaçadas.
- **PASSO 2:** Encontrar as raízes do polinômio característico associado com o modelo linear estimado no passo 1.

- **PASSO 3:** Usando as raízes do passo 2 como as frequências modais complexas para o sinal, determinar a amplitude e a fase inicial para cada modo.

A fim de tornar mais claro o entendimento do método Prony, apresenta-se a seguir a forma como deve ser modelado o sistema para que o método possa ser corretamente aplicado. Posteriormente é descrita a maneira pela qual o método de Prony foi adaptado para permitir a identificação de funções de transferências.

3.2.3.1 Modelagem do Sistema

Objetiva-se a seguir expressar a saída de um sistema dinâmico, linear e invariante no tempo, através de uma equação exponencial, da forma da equação (3.2). Isto demonstra que a metodologia de Prony pode ser aplicada em forma conveniente para este sistema.

Seja um sistema dinâmico linear e invariante no tempo [3,4], com um estado inicial $x(t_0) = x_0$, para uma entrada aplicada em $t = t_0$ e sem entradas posteriores, representado pelas equações a seguir:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.3)$$

$$y = Cx + Du \quad (3.4)$$

onde:

x é o vetor de estados do sistema, de dimensão "n".

(A,B,C,D) representa o sistema dinâmico, linear e invariante no tempo

u vetor de entrada (suposto igual a zero para a presente dedução).

Trabalhando com a transformação de equivalência: $x = Px_m$, tal que ao substituí-la na equação (3.3), e supondo-se os autovalores distintos, tem-se:

$$P \dot{x}_m = APx_m \quad (3.5)$$

$$\dot{x}_m = P^{-1}APx_m \quad (3.6)$$

$$\dot{x}_m = \Lambda x_m \quad (3.7)$$

onde

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_n \end{pmatrix} = P^{-1}AP \quad (3.8)$$

Matriz diagonal de autovalores de A

E a matriz de transformação $P = (p_1 \ p_2 \ \dots \ p_j \ \dots \ p_n)$ é constituída pelos autovetores à direita de A.

Da equação (3.8), tem-se:

$$P\Lambda = AP \quad (3.9)$$

e, sendo p_j o j-ésimo vetor coluna de P, então

$$\lambda_j p_j = Ap_j$$

ou

$$(A - \lambda_j I)p_j = 0 \quad (3.10)$$

Como p_j é diferente de zero, então:

$$|A - \lambda_j I| = 0 \quad (3.11)$$

A inversa da matriz de transformação P , é igual à transposta da matriz de autovetores à esquerda de A , definida por:

$$P^{-1} = \begin{pmatrix} q_1^t \\ q_2^t \\ q_3^t \\ \vdots \\ q_n^t \end{pmatrix} = Q^t \quad (3.12)$$

Pode-se verificar facilmente que:

$$Ap_i = \lambda_i p_i$$

ou

$$(3.13)$$

$$q_i^t A = \lambda_i q_i^t$$

onde:

p_i = autovetores à direita

q_i = autovetores à esquerda

Por outro lado, interessa encontrar a solução da eq. (3.3), para um estado inicial em t_0 . Isto é feito aplicando-se a transformada de Laplace, que resulta em:

$$x(s) = [sI - A]^{-1} x_0 \quad (3.14)$$

Introduzindo a matriz de transformação P , da forma:

$$x(s) = PP^{-1}(sI - A)^{-1}PP^{-1}x_0 \quad (3.15)$$

e usando a equação (3.9), tem-se

$$x(s) = P(sI - \Lambda)^{-1}P^{-1}x_0 \quad (3.16)$$

Pode-se efetuar o desenvolvimento da equação (3.16), na seguinte forma

$$x(s) = \sum_{i=1}^n \frac{p_i(q_i^t x_0)}{s - \lambda_i} = \sum_{i=1}^n \frac{(q_i^t x_0)p_i}{s - \lambda_i} \quad (3.17)$$

A solução desta equação é obtida através da transformada inversa de Laplace, isto é

$$x(t) = \sum_{i=1}^n (q_i^t x_0 e^{\lambda_i t}) p_i \quad (3.18)$$

ou

$$x(t) = \sum_{i=1}^n R_i x_0 e^{\lambda_i t} \quad (3.19)$$

onde $R_i = p_i q_i^t$ é uma matriz de ordem nxn , chamada matriz de resíduos.

Por simplicidade, considerando que só existe uma saída, e substituindo-se a equação (3.19) na equação (3.4), para $D = 0$, o sistema fica da forma:

$$y(t) = C \sum_{i=1}^n R_i x_0 e^{\lambda_i t} \quad (3.20)$$

ou

$$y(t) = \sum_{i=1}^n \tilde{B}_i e^{\lambda_i t} \quad (3.21)$$

onde: $\tilde{B}_i = CR_i x_0$, representa o resíduo do sinal.

Note que, na equação (3.18), a expressão $q_i^T x_0$ é um escalar. Isto implica que o vetor q_i^T determina a influência de x_0 sobre o modo i , e o vetor p_i determina a distribuição deste modo entre os componentes de $x(t)$. Consequentemente, toda informação a cerca de p_i pode ser extraída por meio de uma decomposição modal apropriada de $x(t)$.

A equação (3.20), representa a saída de um sistema dinâmico, linear e invariante no tempo. A mencionada equação é equivalente à equação (3.2), demonstrando desta maneira, que a metodologia de Prony pode ser aplicada ao caso considerado.

3.2.3.2 Obtenção da Função de Transferência

Devido ao fato se o método de Prony não permitir identificar diretamente a função de transferência, diversos autores [6,7], adaptaram esta técnica para aproximar modelos na forma de pólos e resíduos.

A seguir, apresenta-se um enfoque apropriado para a adaptação deste método na identificação de funções de transferência. Considere então a figura 3.1:

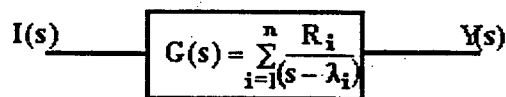


Figura 3.1 Função de Transferência na forma de pólos e resíduos

onde $G(s)$ é a função de transferência representada na forma de pólos e resíduos, $I(s)$ representa uma entrada conhecida, $Y(s)$ é a saída.

Assumindo uma entrada de forma geral, dada por:

$$I(s) = \frac{c_0 e^{-sD_0} + c_1 e^{-sD_1} + \dots + c_k e^{-sD_k}}{s - \lambda_{n+1}} \quad (3.22)$$

onde:

$D_i < D_{i+1}$ tempos de retardo

$c_i, \quad i=1,2,\dots,k$, são constantes arbitrárias

A saída é da forma:

$$Y(s) = G(s)I(s) \quad (3.23)$$

ou

$$Y(s) = \frac{(c_0 e^{-sD_0} + c_1 e^{-sD_1} + \dots + c_k e^{-sD_k})}{s - \lambda_{n+1}} \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s - \lambda_i} \quad (3.24)$$

$$Y(s) = (c_0 e^{-sD_0} + c_1 e^{-sD_1} + \dots + c_k e^{-sD_k}) \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{(s - \lambda_{n+1})(s - \lambda_i)} \quad (3.25)$$

Expressando-se a equação (3.25) na forma de frações parciais, obtém-se:

$$Y(s) = (c_0 e^{-sD_0} + c_1 e^{-sD_1} + \dots + c_k e^{-sD_k}) \left[\frac{Q_{n+1}}{s - \lambda_{n+1}} + \frac{Q_1}{s - \lambda_1} + \dots + \frac{Q_n}{s - \lambda_n} \right] \quad (3.26)$$

onde:

$$Q_i = \frac{R_i}{\lambda_i - \lambda_{n+1}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.27)$$

$$Q_{n+1} = - \left[\frac{R_1}{\lambda_1 - \lambda_{n+1}} + \frac{R_2}{\lambda_2 - \lambda_{n+1}} + \dots + \frac{R_n}{\lambda_n - \lambda_{n+1}} \right] = - \sum_{i=1}^n Q_i \quad (3.28)$$

Achando-se a transformada inversa de Laplace, tem-se:

$$\begin{aligned} y(t) = & c_0 [Q_{n+1} e^{\lambda_{n+1}(t-D_0)} + \sum_{i=1}^n Q_i e^{\lambda_i(t-D_0)}] u(t-D_0) + \\ & + c_1 [Q_{n+1} e^{\lambda_{n+1}(t-D_1)} + \sum_{i=1}^n Q_i e^{\lambda_i(t-D_1)}] u(t-D_1) + \\ & \dots \\ & \dots + c_k [Q_{n+1} e^{\lambda_{n+1}(t-D_k)} + \sum_{i=1}^n Q_i e^{\lambda_i(t-D_k)}] u(t-D_k) \end{aligned} \quad (3.29)$$

A primeira amostra a ser considerada pelo método de Prony é a partir do tempo em que o sinal deixa de ser aplicado ($t \geq D_k$). Com esta consideração, ordenando-se a equação (3.29), resulta:

$$y(t) = Q_1 \left(\sum_{j=0}^k c_j e^{-\lambda_1 D_j} \right) e^{\lambda_1 t} + Q_2 \left(\sum_{j=0}^k c_j e^{-\lambda_2 D_j} \right) e^{\lambda_2 t} + \dots + Q_{n+1} \left(\sum_{j=0}^k c_j e^{-\lambda_{n+1} D_j} \right) e^{\lambda_{n+1} t} \quad (3.30)$$

Fazendo $\tau = t - D_k$, e substituindo em equação (3.30), resulta:

$$y(\tau + D_k)^\Delta = v(\tau) = Q_1 \left(\sum_{j=0}^k c_j e^{\lambda_1(D_k - D_j)} \right) e^{\lambda_1 \tau} + Q_2 \left(\sum_{j=0}^k c_j e^{\lambda_2(D_k - D_j)} \right) e^{\lambda_2 \tau} + \dots + Q_{n+1} \left(\sum_{j=0}^k c_j e^{\lambda_{n+1}(D_k - D_j)} \right) e^{\lambda_{n+1} \tau} \quad (3.31)$$

Em forma simplificada:

$$v(\tau) = \sum_{i=1}^{n+1} \tilde{B}_i e^{\lambda_i \tau} \quad (3.32)$$

onde:

$$\tilde{B}_i = Q_i \left(\sum_{j=0}^k c_j e^{\lambda_i(D_k - D_j)} \right) \quad i=1,2,\dots,n+1 \quad (3.33)$$

Considerando os 'n' primeiros termos da equação (3.32), que correspondem à função de transferência desejada, tem-se:

$$v(\tau) = \sum_{i=1}^n \tilde{B}_i e^{\lambda_i \tau} \quad (3.34)$$

Para um tempo de amostragem t_k , a equação (3.34) pode ser representada por:

$$v(k) = \sum_{j=1}^n \tilde{B}_j Z_j^k \quad (3.35)$$

onde:

$$Z_j = e^{\lambda_j \Delta \tau} \quad (3.36)$$

ou

$$Z_j^k = e^{\lambda_j \tau} \quad (3.37)$$

Observa-se que a equação (3.35) é uma função exponencial, da forma da equação (3.2). Isto mostra claramente que a metodologia de Prony pode ser utilizada perfeitamente para este sistema, o qual foi modificado para permitir identificar a função de transferência. A seguir é analisado o método de Prony com as considerações acima mencionadas.

3.2.3.3 Desenvolvimento do Método [3,5]

Considerando N amostras para $v(k)$, uniformemente espaçadas, apresenta-se a seguir os 3 passos anteriormente mencionados na aplicação do método de Prony. Estes passos são executados no plano 'z'. Para aplicações a sistemas elétricos de potência, os autovalores são geralmente transformados ao plano complexo 's'. Escrevendo a eq. (3.35) na forma matricial:

$$\begin{pmatrix} Z_1^0 & Z_2^0 & \dots & Z_n^0 \\ Z_1^1 & Z_2^1 & \dots & Z_n^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_1^n & Z_2^n & \dots & Z_n^n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_1^{N-1} & Z_2^{N-1} & \dots & Z_n^{N-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{B}_1 \\ \tilde{B}_2 \\ \vdots \\ \tilde{B}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v(0) \\ v(1) \\ \vdots \\ v(N-1) \end{pmatrix} \quad (3.38)$$

onde :

n ordem estimada para a função de transferência.

N número de amostras

Escrevendo a equação (3.38) em forma simplificada, tem-se:

$$Z\tilde{B} = Y \quad (3.39)$$

Os Z_j 's na equação (3.38), são necessariamente as raízes de uma equação polinomial de ordem n , com coeficientes a_j ($1 \leq j \leq n$), desconhecidos, dada da seguinte forma:

$$Z^n = a_1 Z^{n-1} + a_2 Z^{n-2} + \dots + a_{n-1} Z^1 + a_n Z^0 \quad (3.40)$$

A partir da eq. (3.40), a matriz \bar{A} , de dimensão $(I \times N)$ é formada

$$\bar{A} = [-a_n \quad -a_{n-1} \quad \dots \quad -a_2 \quad -a_1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \quad (3.41)$$

Multiplicando membro a membro a equação (3.39) por \bar{A} , tem-se:

$$\bar{A}Y = \bar{A}Z\tilde{B} \quad (3.42)$$

Ordenando esta última equação, e desenvolvendo, obtém-se:

$$v(n) = a_1 v(n-1) + a_2 v(n-2) + \dots + a_{n-1} v(1) + a_n v(0) \quad (3.43)$$

Devido ao tempo inicial escolhido arbitrariamente, a equação (3.43) pode ser aplicada repetidamente, formando a seguinte equação matricial:

$$\begin{pmatrix} v(n-1) & v(n-2) & \dots & v(0) \\ v(n-0) & v(n-1) & \dots & v(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v(N-2) & v(N-3) & \dots & v(N-n-1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v(n) \\ v(n+1) \\ \vdots \\ v(N-1) \end{pmatrix} \quad (3.44)$$

onde:

n = ordem estimada para a função de transferência

N = quantidade de dados convenientemente espaçados

O sistema de equações (3.44), é resolvido pelo método dos mínimos quadrados encontrando-se os valores para os a_i 's, que serão substituídos na equação (3.40).

As raízes da equação (3.40) são os autovalores no plano "z". Conseqüentemente, a partir da equação (3.36), pode-se determinar os autovalores no plano "s", da forma:

$$\lambda_i = \frac{\ln(Z_i)}{\Delta t} \quad (3.45)$$

Posteriormente, com os valores dos Z_i 's e por meio da eq. (3.38), pode-se calcular os valores dos resíduos do sinal (valores simbolizados com as letras \tilde{B}). A técnica empregada para esta resolução foi a dos mínimos quadrados.

Deve-se notar que basicamente o método de Prony termina com a solução das amplitudes complexas (resíduos do sinal, \tilde{B}_i 's).

Das equações (3.27); e (3.33), colocando em evidência os valores de Q_j e igualando ambas, pode-se calcular os resíduos da Função de Transferência, resultando:

$$R_i = \frac{\tilde{B}_i(\lambda_i - \lambda_{n+1})}{\sum_{j=0}^k c_j e^{\lambda_i(D_k - D_j)}} ; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.46)$$

Dispondo dos resíduos da função de transferência através da equação (3.46), e dos autovalores, através da equação (3.45), é possível construir a função de transferência identificada, como mostrada na Fig. 3.1.

3.2.4 Resumo dos Passos do Algoritmo

A seguir apresenta-se um resumo dos passos do algoritmo que estende o método de Prony e que permite identificar a função de transferência:

Passo 1. Especificar um sinal de entrada (equação (3.22)), e obter as amostras a partir do tempo no qual a entrada deixa de ser aplicada ($t \geq D_k$)

Passo 2. Construir um sistema de equações lineares a partir das N amostras (equação (3.44)). Este sistema de equações é resolvido pelo método dos mínimos quadrados, encontrando-se os valores para os a_i 's, que são então substituídos na equação (3.40).

Passo 3. Encontrar os autovalores no plano "z", a partir do polinômio característico (equação (3.40)), associado com o sistema linear do passo 2.

Passo 4. Encontrar os autovalores no plano "s", usando a equação (3.45).

Passo 5. Encontrar os resíduos do sinal a partir da equação (3.38).

Passo 6. Encontrar os resíduos da função de transferência, a partir da equação (3.46).

Passo 7. Representar a função de transferência ($G(s)$), na forma de pólos e resíduos (ver Figura 3.1).

3.2.5 Avaliação do Método

O método de Prony permite identificar, através de modelos lineares de ordem reduzida, sistemas operando na vizinhança de um ponto de equilíbrio. A análise de Prony pode combinar várias maneiras a fim de obter os autovalores do sistema e resíduos da função de transferência, permitindo trabalhar no plano "s" ou no plano "z".

A maioria das técnicas de projeto dos controles de realimentação, estas são baseadas em modelos matemáticos lineares e invariantes no tempo da planta analisada, mas acontece que geralmente os sistemas são não-lineares e variantes no tempo, além de serem de ordem extremamente elevada, como é o caso dos grandes sistemas de potência. Com a finalidade de projetar os controles para tais sistemas, geralmente são empregados modelos lineares de ordem reduzida, que representam a planta, operando em torno de um ponto de equilíbrio. Devido à complexidade e ao tamanho dos sistemas, torna-se muito difícil obter uma aproximação física, aceitável do modelo reduzido. Desta maneira, surgem como alternativa métodos de identificação de sistemas baseados em dados de entrada/saída.

Através deste método de identificação do sinal, é possível a sua aplicação a uma grande variedade de plantas, por exemplo, a grandes sistemas de potência. Com muita frequência em sistemas de potência ocorrem amortecimentos fracos e oscilações de baixa frequência, devido a mudanças de despacho dos geradores. Vários controles foram

propostos para amortecer estas oscilações, através de unidades Estabilizadoras de Sistemas de Potência (ESP) conectadas às excitatrizes dos geradores.

O método de Prony não requer excitação persistente. Isto faz a principal diferença com outros métodos desenvolvidos na literatura, geralmente baseados na idéia de minimizar o erro através de mínimos quadrados, o que traz inconvenientes para sistemas de ordem elevada. O método de Prony é baseado na identificação do sinal, sendo bem apropriado para sistemas de ordem elevada.

É importante notar que a análise convencional de Prony identifica o modelo para o sinal, e não o sistema ou a função de transferência. No entanto, como mostrado anteriormente, o método pode ser adaptado para identificar funções de transferência [6,7].

3.2.5.1 Exigências do Método

O método apresentado na seção anterior, usando a análise de Prony, requer o conhecimento de um sinal de entrada. A saída do processo é estudada usando a análise do sinal via Prony. Estas amostras de saída devem ser uniformemente distribuídas. Desta maneira pode-se obter o modelo reduzido para um determinado sistema multi-máquinas. O tipo de entrada que pode ser aplicada a um sistema de potência em forma conveniente é, geralmente, um pulso de onda quadrada [6].

Outra exigência do método é que o sistema deve estar operando com condições iniciais iguais a zero, antes do sinal de entrada ser aplicado. Com sistemas de potência é vantajoso obter o modelo da planta imediatamente após o distúrbio, enquanto o sistema encontra-se oscilando.

Devido ao fato de o método de Prony não ser um processo iterativo, o esforço computacional é pequeno.

A seguir são apresentados dois métodos de redução de ordem baseados no conceito das realizações balanceadas.

3.3 Método da Ótima Norma de Hankel - Moore para Sistemas Multivariáveis

3.3.1 Introdução

Os métodos tradicionais para redução de ordem, geralmente são baseados em conceitos de análise modal ou domínio da frequência. Dois métodos são expostos neste estudo: Método de redução de ordem de Moore e Método da Ótima Norma de Hankel. Eles diferem dos demais por introduzirem duas definições fundamentais, as quais se referem à teoria das realizações balanceadas e à aproximação através da ótima norma de Hankel, respectivamente.

O método de Moore, analisa o problema de redução de ordem de sistemas lineares, como será exposto a seguir:

Dado um sistema linear (A, B, C) , invariante no tempo, com múltiplas entradas e múltiplas saídas, de ordem n , deseja-se obter um outro sistema linear (A_k, B_k, C_k) , invariante no tempo com múltiplas entradas e múltiplas saídas, de ordem k , com $k < n$, que se aproxime com boa precisão ao sistema original.

Os sistemas (A, B, C) e (A_k, B_k, C_k) serão denominados respectivamente sistema real de ordem n e sistema reduzido de ordem k .

A técnica de Moore considera um sistema real como sendo controlável, observável e assintoticamente estável. Isto significa que tanto a matriz gramiana de controlabilidade quanto a matriz gramiana de observabilidade são definidas positivas e possuem autovalores reais e positivos. Moore [23] demonstrou que existe uma transformação, que aplicada ao sistema real, faz com que as duas matrizes gramianas sejam iguais e diagonais. Em tais matrizes, os elementos das diagonais são os valores singulares das gramianas. Tal representação é denominada balanceada. Finalmente o sistema reduzido

pelo método de Moore é obtido eliminando as últimas $n-k$ linhas e colunas respectivamente do sistema balanceado, tendo Moore demonstrado que elas correspondem aos modos de menor importância.

A primeira parte do método da mínima norma de Hankel, consiste em determinar uma realização balanceada para o sistema, utilizando para isto o procedimento proposto por Moore. A seguir, deve-se aplicar a definição da aproximação de ótima norma de Hankel. Com estas técnicas é possível calcular o erro da resposta em frequência entre o sistema real e o modelo reduzido.

Os gramianos de controlabilidade e de observabilidade são usados para definir os índices de controlabilidade e observabilidade respectivamente, em certas direções do espaço de estado. Estas matrizes gramianas não são invariantes para transformações de coordenadas, e existe um sistema de coordenadas para o qual elas são iguais e diagonais. A representação do sistema correspondente se denomina Realização Balanceada. De acordo com Moore [23], um modelo reduzido pode ser obtido a partir da representação na forma de uma realização balanceada, desprezando-se a parte menos controlável, e em consequência também a menos observável, sendo estas as últimas linhas/colunas desta realização.

Como citado anteriormente, Glover [24] aperfeiçou a técnica descrita, introduzindo a solução do problema da aproximação da mínima norma de Hankel. Desta maneira permite-se uma caracterização completa de todas as aproximações que minimizam a norma entre a função de transferência real e a função de transferência aproximada, permitindo também conhecer o erro que se produz devido à redução.

3.3.2 Definição do Problema

Esta seção apresenta a formulação do problema de redução de Moore e da ótima norma de Hankel. É importante ressaltar que todo este estudo será realizado para qualquer sistema dinâmico, linear, invariante no tempo e estável, representado por

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.47)$$

$$y = Cx + Du \quad (3.48)$$

cuja função de transferência é dada por:

$$G(s) = D + C(sI - A)^{-1}B \quad (3.49)$$

Se os autovalores de A tem parte real negativa, pode-se definir a matriz gramiana de controlabilidade dada por:

$$P = \int_0^{\infty} e^{At}BB^*e^{A^*t}dt \quad (3.50)$$

e a matriz gramiana de observabilidade dada por:

$$Q = \int_0^{\infty} e^{A^*t}C^*Ce^{At}dt \quad (3.51)$$

as quais são simétricas e positiva definidas e satisfazem as equações de Lyapunov [24]:

$$AP + PA^* + BB^* = 0 \quad (3.52)$$

$$A^*Q + QA + C^*C = 0 \quad (3.53)$$

3.3.2.1 Definição dos Valores Singulares de Hankel [24]

Se $\text{Re}(\lambda_i(A)) < 0 \quad \forall i$, então os valores singulares de Hankel da matriz

$G(s)$ tem a seguinte definição:

$$\sigma_i(G(s)) = [\lambda_i(PQ)]^{\frac{1}{2}} \quad (3.54)$$

onde por convenção

$$\sigma_i(G(s)) \geq \sigma_{i+1}(G(s)) \quad (3.55)$$

Onde $G(s)$, P , Q , são definidas pelas equações (3.49), (3.50) e (3.51), respectivamente.

Esta definição tem uma particular importância pois os valores singulares de Hankel podem ser interpretados como os valores singulares de uma transformação, cujo domínio são as entradas passadas e cujo contradomínio são as saídas futuras.

3.3.2.2 Definição da Norma Hankel [24]

Seja a função de transferência representada pela equação (3.49), com $\text{Re}(\lambda_i(A)) < 0 \quad \forall i$, então a norma de Hankel para $G(s)$ está definida como:

$$\|G(s)\|_{L^\infty} = \sigma_1 = [\lambda_{\max}(PQ)]^{\frac{1}{2}} \quad (3.56)$$

onde $G(s)$, P , Q , σ_1 são definidos pelas equações (3.49), (3.50), (3.51) e (3.54) respectivamente.

As definições a seguir, validam o teorema 3.1 que será apresentado posteriormente:

Definição 3.1 [24]: Define-se grau de McMillan como o número exato de pólos estáveis de todas as matrizes P e Q que satisfazem as equações de Lyapunov.

Definição 3.2 [24]: Seja $G(s) = C \rightarrow C_{pxm}$, então $G(j\omega) \in L^\infty(-\infty, \infty)$, se somente se $\exists M < \infty$, tal que $\sigma(G(j\omega)) \leq M \quad \forall \omega \in \mathbb{R}$, e a norma neste espaço é denotada por:

$$\|G(j\omega)\|_{L^\infty} \stackrel{\Delta}{=} \sup \sigma(G(j\omega))$$

Definição 3.3 [24]: Seja $G(s) = C \rightarrow C_{pxm}$, tal que $G \in H_+^\infty$ (respectivamente H_-^∞), se somente se, G é analítica no semiplano direito aberto (respectivamente esquerdo), e limitada no semiplano direito fechado (respectivamente esquerdo). Esta definição implica que H_+^∞ e H_-^∞ são subespaços de L^∞ ;

onde: C espaço euclidiano complexo
 C_{pxm} espaço euclidiano complexo de dimensão pxm

O teorema a seguir apresenta um resultado importante no uso da norma de Hankel, mostrando a aproximação de uma função de transferência causal $G(j\omega)$, por uma função de transferência não-causal.

Teorema 3.1 [24]

Para uma função de transferência racional $G(s)$, analítica no semiplano direito, então

$$\sigma_1(G(s)) = \|G(s)\|_H = \inf \|G(j\omega) - F(j\omega)\|_{L^\infty} \quad (3.57)$$

$$\text{tal que} \quad F(j\omega) \in H_-^\infty \quad (3.58)$$

onde

L^∞ é um espaço vetorial definido em $(-\infty; \infty)$

H_-^∞ é um subespaço de L^∞ no semiplano esquerdo.

Cabe salientar a importância deste teorema porquanto mostra que a norma de $G(s)$ dada pelo maior valor singular σ_1 , representa o valor da norma de $\|G(j\omega) - F(j\omega)\|_{L^\infty}$.

Deve-se salientar que o problema de aproximar uma função de transferência por outra função de transferência de grau menor, através da ótima norma de Hankel consiste em: Dada uma função de transferência $G(s)$ de grau McMillan n , encontrar uma função de transferência $\hat{G}(s)$ de grau McMillan $k < n$, tal que minimize a norma do erro $\|G(s) - \hat{G}(s)\|_H$. Este problema é formulado conforme o teorema abaixo:

Teorema 3.2 [24]

Dada uma função de transferência $G(s)$, racional e estável, então:

$$(1) \quad \sigma_{k+1} = \inf_{F \in H^\infty} \|G(j\omega) - \hat{G}(j\omega) - F(j\omega)\|_{L^\infty}, \text{ com grau de McMillan } (\hat{G}) \leq k$$

(2) Se $G(s)$ tem os valores singulares de Hankel $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_k > \sigma_{k+1} = \sigma_{k+2} = \dots = \sigma_{k+r} > \sigma_{k+r+1} \geq \dots \geq \sigma_n > 0$, então $\hat{G}(s)$ de grau k é uma aproximação de acordo com o critério da ótima norma de Hankel para $G(s)$ se e somente se existe uma $F(s) \in H^\infty$ (cujo grau de McMillan pode ser escolhido $\leq n+k-1$), tal que o erro define-se como $E(s) = G(s) - \hat{G}(s) - F(s)$, e que satisfaz:

$$E(s)E^*(-s) = \sigma_{k+1}^2 I \quad (3.59)$$

em tal caso

$$\|G(s) - \hat{G}(s)\|_H = \sigma_{k+1} \quad (3.60)$$

Através deste teorema conclui-se que $\|G(j\omega) - \hat{G}(j\omega)\|_{L^\infty} \leq \sigma_{k+1}(G(s)) + \|F(j\omega)\|_{L^\infty}$, onde $\|F(j\omega)\|_{L^\infty} \leq \sigma_{k+2}(G(s)) + \dots + \sigma_n(G(s))$.

Outro aspecto importante que vale salientar, consiste no comportamento dos valores singulares de Hankel em relação à resposta em frequência, conforme apresentado por Glover [24], no exemplo abaixo.

Exemplo 3.1 [24]

Seja a função de transferência :
$$G(s) = \left(\frac{1-0.05s}{1+0.05s} \right)^{10} \frac{1}{(1+sT)}$$

Os onze valores singulares de Hankel para $G(s)$ são plotados na figura 3.2 para T variável.

Pode-se ver que quando $T \rightarrow 0$, todos os valores singulares $\sigma_i \rightarrow 1$, mas quando T aumenta, os menores valores singulares decrescem significativamente, tal que para este exemplo, quando $T=10$, pode-se conseguir uma aceitável aproximação da função de transferência através de uma função de transferência de segunda ordem, sendo os demais valores singulares desprezíveis

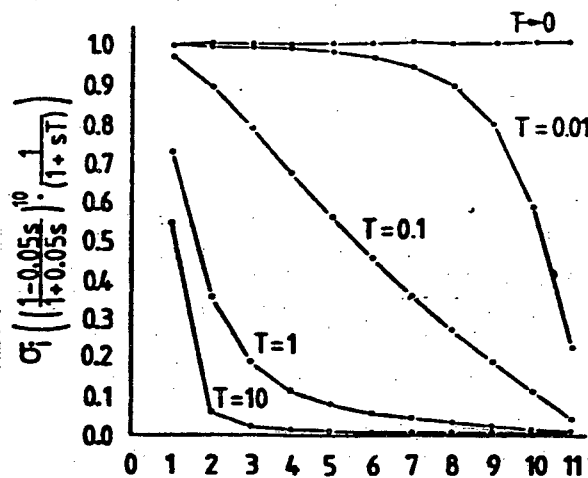


Fig. 3.2 Localização dos valores singulares de Hankel (Ex. 3.1), para

diferentes valores de T

Com estes teoremas e definições fundamentais pode-se formular o problema do modelo reduzido, o qual consiste em achar uma função de transferência $\hat{G}_k(s)$ de grau de McMillan $k < n$ tal que minimize a norma do erro $\|G(s) - \hat{G}_k(s)\|$.

3.3.2.3 O Problema

Como mostrado no item anterior, supõe-se que foi fornecido o espaço de estado (A, B, C, D) , sendo necessário achar uma função de transferência de grau k de McMillan que se aproxime com boa precisão ao sistema original.

Este processo pode ser resumido nos seguintes passos:

Passo 1: (Método de Moore) Formar uma realização balanceada de acordo com o seguinte algoritmo [19,20,21,22,23,24]:

a) Calcular as matrizes hermitianas P e Q a partir das equações de Lyapunov:

$$AP + PA^* + BB^* = 0 \quad (3.61)$$

$$A^*Q + QA + C^*C = 0 \quad (3.62)$$

b) Fatorar a matriz Q por Cholesky [23,24]: $Q = RR^*$ (3.63)

onde R é uma matriz triangular superior.

c) Decompor em valores singulares a matriz definida positiva RPR^*

$$\text{svd}(RPR^*) = U \Sigma^2 U^* \quad (3.64)$$

sendo U uma matriz ortonormal tal que $U^*U = I$, e a matriz Σ é uma matriz diagonal contendo os valores singulares de Hankel, do tipo:

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1 & & & \\ & \sigma_2 & & \\ & & \sigma_3 & \\ & & & \sigma_n \end{pmatrix} \quad (3.65)$$

e

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n > 0$$

A transformação de balanceamento é definida como:

$$T = \Sigma^{-\frac{1}{2}} U^* R \quad (3.66)$$

Finalmente, através do seguinte teorema pode-se estabelecer a realização balanceada.

Teorema 3.3: [24]

Para todo sistema estável (A, B, C) , existe uma matriz de transformação T tal que (TAT^{-1}, TB, CT^{-1}) (realização balanceada), tem matrizes gramianas de controlabilidade e observabilidade gramiana dadas por:

$$P = \text{diag}(\Sigma_1, \Sigma_2, 0, 0) \quad (3.67)$$

$$Q = \text{diag}(\Sigma_1, 0, \Sigma_3, 0) \quad (3.68)$$

sendo $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3 > 0$ e diagonais.

Finalmente o modelo reduzido pelo método de Moore é obtido eliminando as últimas $n-k$ linhas/colunas do sistema balanceado. A seguir, deverá aplicar-se o critério da aproximação através da mínima norma de Hankel, da forma:

d) Comparar os valores singulares de Hankel, tal que se assegure o critério da mínima norma de Hankel. Isto é realizado usando a parte (2) do teorema 3.2, como a seguir.

$$\sigma_{k+1} \leq \|G(j\omega) - \hat{G}(j\omega)\|_{L^\infty} \leq N_k \quad (3.69)$$

onde

$$N_k = \sigma_{k+1} + \sigma_{k+2} + \dots + \sigma_n \quad (3.70)$$

A escolha do grau k de McMillan é função dos valores singulares, devendo ser o valor de N_k imediatamente maior que o valor de σ_{k+1} .

Deve-se enfatizar que a mínima norma esta definida com elementos dentro de um espaço vetorial de dimensão infinita (L).

e) Uma vez escolhido o grau de Mc Millan para a redução, deve-se reordenar a realização balanceada, particionando-a tal que:

$$A_b = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}; \quad B_b = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix}; \quad C_b = (C_1 \quad C_2) \quad (3.71)$$

$$\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k, \sigma_{k+2}, \dots, \sigma_n, \sigma_{k+1}) = \text{diag}(\Sigma_1, \sigma_{k+1}) \quad (3.72)$$

Deve-se notar que A_{11} é uma matriz quadrada de dimensão $(n-1) \times (n-1)$.

Passo 2: Achar uma função de transferência $\hat{G}(s) + F(s)$ (Teor. 3.2), fazendo uso das seguintes definições:

$$U = -(C_2 B_2)(B_2 B_2^*)^{-1} \quad (3.73)$$

$$\Gamma = (\Sigma_1^2 - \sigma_{k+1}^2 I) \quad (3.74)$$

$$\hat{A} = \Gamma^{-1}(\sigma_{k+1}^2 A_{11}^* + \Sigma_1 A_{11} \Sigma_1 - \sigma_{k+1} C_1^* U B_1^*) \quad (3.75)$$

$$\hat{B} = \Gamma^{-1}(\Sigma_1 B_1 + \sigma_{k+1} C_1^* U) \quad (3.76)$$

$$\hat{C} = C_1 \Sigma_1 + \sigma_{k+1} U B_1^* \quad (3.77)$$

$$\hat{D} = D - \sigma_{k+1} U \quad (3.78)$$

$$\hat{G}(s) + F(s) = \hat{C}(sI - \hat{A})^{-1} \hat{B} + \hat{D} \quad (3.79)$$

onde $F(s)$ é instável.

Com estas novas matrizes é possível achar o erro devido à aproximação, construindo um novo sistema:

$$A_e = \begin{pmatrix} Ab & 0 \\ 0 & \hat{A} \end{pmatrix}; B_e = \begin{pmatrix} Bb \\ \hat{B} \end{pmatrix}; C_e = \begin{pmatrix} Cb & \hat{C} \end{pmatrix}; D_e = (D - \hat{D}) \quad (3.80)$$

que também satisfaz as equações de Lyapunov:

$$A_e P_e + P_e A_e^* + B_e B_e^* = 0 \quad (3.81)$$

$$A_e^* Q_e + Q_e A_e + C_e^* C_e = 0 \quad (3.82)$$

onde:

$$P_e = \begin{pmatrix} \Sigma_1 & 0 & I \\ 0 & \sigma I & 0 \\ I & 0 & \Sigma_2 \Gamma^{-1} \end{pmatrix}; Q_e = \begin{pmatrix} \Sigma_2 & 0 & -\Gamma \\ 0 & \sigma I & 0 \\ -\Gamma & 0 & \Sigma_1 \Gamma \end{pmatrix} \quad (3.83)$$

tal que: $P_c Q_c = \sigma^2 I$ (3.84)

Vale salientar que o método também permite determinar resultados intermediários, tais como a inércia do modelo reduzido. Define-se a inércia de uma matriz quadrada \hat{A} como a tripla $(\pi(\hat{A}), \gamma(\hat{A}), \partial(\hat{A}))$, e é denotada como $\text{In}(\hat{A})$. Aqui

$\pi(\hat{A})$ = Número de autovalores de \hat{A} , no plano direito aberto;

$\gamma(\hat{A})$ = Número de autovalores de \hat{A} , no plano esquerdo aberto;

$\partial(\hat{A})$ = Número de autovalores de \hat{A} no eixo imaginário.

Baseado na definição acima, o teorema a seguir garante que a mínima realização tenha sido encontrada.

Teorema 3.4 [24]

Se $\partial(A) = 0$, então:

a) $\partial(\hat{A}) = 0$

b) Se $\partial(\Sigma_1 \Sigma_2) = 0$, então: $\text{In}(\hat{A}) = \text{In}(-\Sigma_1 \Gamma) = \text{In}(-\Sigma_2 \Gamma)$

c) Se $P > 0$ e $Q > 0$ então o grau de Mc. Millan para a parte estável de $(\hat{A}, \hat{B}, \hat{C})$, é igual $\pi(\Sigma_1 \Gamma) = \pi(\Sigma_2 \Gamma)$.

d) Satisfazendo (i) ou (ii):

i) $\Sigma_1 \Gamma > 0$ e $\Sigma_2 \Gamma > 0$

ou

ii) $\Sigma_1 \Gamma < 0$ e $\Sigma_2 \Gamma < 0$

Então $(\hat{A}, \hat{B}, \hat{C})$ é a mínima realização.

Passo 3: Este passo consiste em reordenar e diagonalizar a matriz \hat{A} , separando a parte estável da parte instável. Objetiva-se com isto obter as matrizes de entrada e saída para o sistema reduzido. Uma maneira de realizar este processo é efetuar os seguintes passos:

a) Reduzir \hat{A} para a forma superior de Schur, ou seja, achar uma matriz V_1 tal que

$$V_1' V_1 = I \quad (3.85)$$

E o produto $V_1' \hat{A} V_1$, esteja na forma superior de Schur.

b) Achar uma matriz V_2 , ortogonal, tal que :

$$V_2' V_1' \hat{A} V_1 V_2 = \begin{pmatrix} \hat{A}_{11} & \hat{A}_{12} \\ 0 & \hat{A}_{22} \end{pmatrix} \quad (3.86)$$

onde: $\text{Re}(\lambda_i(\hat{A}_{11})) < 0$; $\text{Re}(\lambda_i(\hat{A}_{22})) > 0$

c) Achar uma matriz X , tal que com as matrizes encontradas no passo anterior, satisfaçam a equação de Lyapunov, da forma seguinte:

$$\hat{A}_{11} X - X \hat{A}_{22} + \hat{A}_{22} = 0 \quad (3.87)$$

d) Este passo encontra e particiona as transformações T e S , através das quais pode-se calcular as matrizes de entrada e saída do modelo reduzido :

$$T = V_1 V_2 \begin{pmatrix} I & X \\ 0 & I \end{pmatrix} = (T_1 \quad T_2) \quad (3.88)$$

$$S = \begin{pmatrix} I & -X \\ 0 & I \end{pmatrix} V_2' V_1' = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \end{pmatrix} \quad (3.89)$$

e) Através das transformações obtidas no passo anterior, calcula-se as matrizes de entrada e saída, da forma:

$$\hat{B}_1 = S_1 \hat{B} \quad (3.90)$$

$$B_2 = S_2 \hat{B} \quad (3.91)$$

$$\hat{C}_1 = \hat{C} T_1 \quad (3.92)$$

$$\hat{C}_2 = \hat{C} T_2 \quad (3.93)$$

Finalmente, a função de transferência do modelo reduzido, através do critério da ótima norma de Hankel é definida a seguir

$$\hat{G}(s) = \hat{D} + \hat{C}_1 (sI - \hat{A}_{11})^{-1} \hat{B}_1 \quad (3.94)$$

sendo a mínima norma :

$$\|G(s) - \hat{G}(s)\|_{L^\infty} \leq \sigma_{k+1} + \mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_{n-k-1} \quad (3.95)$$

OBS: No processo de cálculo da matriz \hat{D} , é necessário encontrar uma realização balanceada do sistema $(-\hat{A}_{22}, \hat{B}_2, \hat{C}_2, \hat{D})$ [24]. Os termos $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_{n-k-1}$, mostrados na eq. (3.95) correspondem aos valores singulares de Hankel da realização balanceada mencionada acima. Vale aclarar que neste trabalho, a matriz \hat{D} foi considerada nula, e o seu respectivo cálculo foi omitido.

3.3.3 Avaliação do Método de Moore

Nesta secção são avaliados os pontos principais do trabalho de Moore [23]. Fundamentalmente é enfocado o problema das propriedades de entrada/saída refletidas pela matriz de resposta impulsiva que não dão informações completas sobre as componentes internas do sistema. Isto significa que a menos da escolha de uma base muito

particular, a existência de pequenas componentes nas respostas internas $e^{At}B$ ou $e^{At}C^*$ pouco implicam com relação às propriedades entrada/saída do modelo, podendo gerar problemas na redução de ordem do modelo [43]. Para superar este problema Moore escolheu uma base especial, onde as propriedades de entrada/saída são refletidas pelos componentes principais internos. A representação do sistema nesta base recebe o nome de realização balanceada, que fundamentalmente consiste em obter gramianas de controlabilidade e observabilidade iguais e diagonais. Este processo é necessário pois permite localizar os estados "menos controláveis" e "menos observáveis", além de permitir trocar a controlabilidade pela observabilidade e vice versa na análise de um sistema.

Uma construção razoável do modelo reduzido é conseguida desprezando os estados "menos controláveis" e "menos observáveis" da realização balanceada. A metodologia utilizada para identificar os estados "menos" controláveis (e observáveis) é através da decomposição em valores singulares das gramianas.

Finalmente é importante salientar que a aproximação através do modelo reduzido de uma realização balanceada estável, é também estável e balanceada [22,35].

3.3.3.1 Importância da Frequência na Representação Balanceada e no Modelo Reduzido

Pode-se concluir a partir dos resultados de simulação, que os modelos reduzidos balanceados são bastante apropriados em respostas transitórias para sistemas de ordem total, mas em alguns casos podem produzir grandes erros de aproximação. Isto é devido ao fato de que os resultados balanceados podem modificar bastante o ganho para sistemas de ordem elevada e modelos de ordem reduzida. Com este método, para elevadas frequências, o erro na redução tende a zero, podendo-se concluir que a aproximação é melhor para elevadas frequências do que para baixas frequências.

3.3.3.2 Avaliação do Método da Mínima Norma de Hankel

Como foi mostrado no método de redução de Moore, a técnica de redução de modelos através das realizações balanceadas basicamente consiste em ordenar os estados com respeito a suas entradas/saídas. Aqueles estados que são fortemente influenciados pelas entradas e/ou fortemente conectados às saídas deverão permanecer no modelo reduzido, já que eles correspondem aos modos mais controláveis e mais observáveis, respectivamente. A idéia principal desta técnica é obter um modelo reduzido dominante. Deve-se observar, que se bem a redução de modelos via realizações balanceadas [23] proporcione resultados satisfatórios na maioria das situações, às vezes é necessário quantificar o erro alcançado neste processo. Com este propósito, o critério da norma de Hankel é equivalente no domínio da frequência a minimizar a norma em um espaço L_∞ , para reduzir o erro.

Como dito anteriormente, a técnica de aproximação de um modelo reduzido através da norma ótima Hankel, tem como base fundamental a redução do sistema na forma balanceada. O critério consiste em minimizar o pior erro. No domínio da frequência, este critério é equivalente a considerar a importância da magnitude do maior pico no erro.

Devido ao fato do método da mínima norma de Hankel requerer muitos passos intermediários, o esforço computacional é grande, sendo esta uma das maiores limitações do método, além de dificultar a utilização de técnicas de esparsidade. Além disso, a utilização de várias transformações impede o relacionamento do modelo de ordem reduzida com o sistema original.

3.3.3.4 Comentários

Este estudo trata da caracterização de todas as aproximações da ótima norma de Hankel para funções de transferência racionais. Este método permite mostrar os erros conseguidos na resposta em frequência, ao se considerar o critério da mínima norma, dentro de um espaço vetorial. Estes erros são relacionados com uma análise somente dos valores singulares de Hankel. Pode-se concluir que o método proposto é um dos mais efetivos, porquanto ele permite um critério para a escolha da ordem reduzida, isto é a dimensão do modelo reduzido não precisa necessariamente ser definida a priori.

Deve ser enfatizado que os valores singulares de Hankel são invariantes na redução de modelos.

Outra vantagem do método é permitir a obtenção de resultados intermediários, como por exemplo, a inércia das matrizes.

3.4 Método de Levy

3.4.1 Introdução

A análise matemática dos Sistemas Dinâmicos Lineares, baseada em resultados de provas experimentais, requer às vezes que a resposta em frequência de um sistema seja convenientemente representada por uma expressão algébrica. A forma preferida desta expressão é como uma relação de dois polinômios dependentes da frequência como segue:

$$G(j\omega) = \frac{A_0 + A_1(j\omega) + A_2(j\omega)^2 + A_3(j\omega)^3 + \dots}{B_0 + B_1(j\omega) + B_2(j\omega)^2 + B_3(j\omega)^3 + \dots} \quad (3.96)$$

O problema se reduz a avaliar os coeficientes desconhecidos, da equação anterior, através da solução de um sistema de equações algébricas. Os coeficientes deste sistema de equações são funções da relação de amplitude e variação de fase considerados para vários valores de frequência.

3.4.2 Dedução do Método

Para uma melhor manipulação da equação (3.96), é conveniente separar o numerador e o denominador em suas partes reais e imaginárias

$$G(j\omega) = \frac{(A_0 - A_2\omega^2 + A_4\omega^4 - \dots) + j\omega(A_1 - A_3\omega^2 + A_5\omega^4 - \dots)}{(B_0 - B_2\omega^2 + B_4\omega^4 - \dots) + j\omega(B_1 - B_3\omega^2 + B_5\omega^4 - \dots)} \quad (3.97)$$

$$G(s) = \frac{\alpha + j\omega\beta}{\sigma + j\omega\tau} \quad (3.98)$$

$$= \frac{N(\omega)}{D(\omega)} \quad (3.99)$$

Além disso, considera-se a restrição $B_0 = 1$.

Seja $F(j\omega)$ a função original, da qual são extraídas as amostras. Ela tem uma componente real e uma imaginária, as quais coincidem exatamente com os valores indicados por uma curva experimental. A função considerada tem a seguinte forma:

$$F(j\omega) = R(\omega) + jI(\omega) \quad (3.100)$$

A diferença numérica entre a função real $F(j\omega)$ e a aproximação $G(j\omega)$ representa o erro, representado por:

$$\varepsilon(\omega) = F(j\omega) - G(j\omega) \quad (3.101)$$

$$= F(j\omega) - \frac{N(\omega)}{D(\omega)} \quad (3.102)$$

Desta forma o problema a ser resolvido é a minimização desse erro em cada um dos pontos de amostragem da curva. Multiplicando a equação (3.102) por $D(\omega)$, e separando na parte real e a parte imaginária, tem-se:

$$D(\omega)\varepsilon(\omega) = a(\omega) + jb(\omega) \quad (3.103)$$

Onde $a(\omega)$ e $b(\omega)$ são funções não só da frequência, como também dos coeficientes desconhecidos A_i e B_i .

O módulo desta função é:

$$|D(\omega)\varepsilon(\omega)| = |a(\omega) + jb(\omega)| = \sqrt{a^2(\omega) + b^2(\omega)} \quad (3.104)$$

Onde a soma dos quadrados de todos os módulos esta representada por:

$$E = \sum_{k=0}^m [a^2(\omega_k) + b^2(\omega_k)] \quad (3.105)$$

Desta forma os coeficientes A_i e B_i são avaliados com o critério de minimizar a função E . Com este propósito é conveniente escrever a equação (3.105) numa forma ordenada a partir de algumas das equações anteriores, na seguinte forma:

Das equações (3.102) e (3.103), tem-se:

$$a(\omega) = \text{Re}[D(\omega)F(j\omega) - N(\omega)] \quad (3.106)$$

$$b(\omega) = \text{Im}[D(\omega)F(j\omega) - N(\omega)] \quad (3.107)$$

Das equações (3.98) e (3.99), tem-se:

$$D(\omega) = \sigma + j\omega\tau \quad (3.108)$$

$$F(j\omega) = R + jI \quad (3.109)$$

$$N(\omega) = \alpha + j\omega\beta \quad (3.110)$$

tal que, multiplicando as equações (3.108) e (3.109), obtem-se uma expressão da forma:

$$D(\omega)F(j\omega) = (\sigma R - \omega\tau I) + j(\omega R\tau + \sigma I) \quad (3.111)$$

e subtraindo nesta última equação, a equação (3.110), tem-se

$$D(\omega)F(j\omega) - N(\omega) = (\sigma R - \omega\tau I - \alpha) + j(\omega R\tau + \sigma I - \omega\beta) \quad (3.112)$$

Da comparação das equações (3.102) e (3.103), com a equação (3.105), tem-se:

$$a(\omega) = \sigma R - \omega\tau I - \alpha \quad (3.113)$$

$$b(\omega) = \omega R\tau + \sigma I - \omega\beta \quad (3.114)$$

Substituindo as equações (3.108) e (3.109) na equação (3.105), tem-se:

$$E = \sum_{k=0}^m \left[(R_k \sigma_k - \omega_k \tau_k I_k)^2 + (\omega_k \tau_k R_k + \sigma_k I_k - \omega_k \beta_k)^2 \right] \quad (3.115)$$

Com o objetivo de encontrar o mínimo da função E, aplica-se o critério da primeira derivada igual a zero. Este critério é aplicado com relação a todas as variáveis desconhecidas A_i e B_i , como é mostrado a seguir:

$$\frac{\partial E}{\partial A_0} = \sum_{k=0}^m -2(R_k \sigma_k - \omega_k \tau_k I_k - \alpha_k) = 0 \quad (3.116a)$$

$$\frac{\partial E}{\partial A_1} = \sum_{k=0}^m -2\omega_k (\omega_k \tau_k R_k + \sigma_k I_k - \omega_k \beta_k) = 0 \quad (3.116b)$$

$$\frac{\partial E}{\partial A_2} = \sum_{k=0}^m 2\omega_k^2 (R_k \sigma_k - \omega_k \tau_k I_k - \alpha_k) = 0 \quad (3.116c)$$

$$\frac{\partial E}{\partial B_0} = 0 \quad (3.116d)$$

$$\frac{\partial E}{\partial B_1} = \sum_{k=0}^m [-2\omega_k I_k (R_k \sigma_k - \omega_k \tau_k I_k - \alpha_k) + 2\omega_k R_k (\omega_k \tau_k R_k + \sigma_k I_k - \omega_k \beta_k)] = 0 \quad (3.116e)$$

$$\frac{\partial E}{\partial B_2} = \sum_{k=0}^m [-2R_k \omega_k^2 (R_k \sigma_k - \omega_k \tau_k I_k - \alpha_k) - 2I_k \omega_k^2 (\omega_k \tau_k R_k + \sigma_k I_k - \omega_k \beta_k)] = 0 \quad (3.116f)$$

Nas equações anteriores, os termos que contem as incógnitas devem ser isolados através das seguintes transformações lineares:

$$\alpha_k = A_0 - \alpha'_k \quad (3.117)$$

$$\beta_k = A_1 - \beta'_k \quad (3.118)$$

$$\sigma_k = B_0 - \sigma'_k = 1 - \sigma'_k \quad (3.119)$$

$$\tau_k = B_1 - \tau'_k \quad (3.120)$$

Substituindo as transformações anteriores nas equações (3.116), tem-se:

$$\sum_{k=0}^m [A_0 - \alpha'_k + R_k \sigma'_k + \omega_k I_k B_1 - \omega_k I_k \tau'_k] = \sum_{k=0}^m R_k \quad (3.121a)$$

$$\sum_{k=0}^m [-\omega_k^2 R_k (B_1 - \tau'_k) + \omega_k \sigma'_k I_k + \omega_k^2 (A_1 - \beta'_k)] = \sum_{k=0}^m \omega_k I_k \quad (3.121b)$$

$$\sum_{k=0}^m [\omega_k^2 R_k \sigma'_k + \omega_k^3 I_k (B_1 - \tau'_k) + \omega_k^2 (A_0 - \alpha'_k)] = \sum_{k=0}^m \omega_k^2 R_k \quad (3.121c)$$

$$\sum_{k=0}^m [\omega_k I_k (A_0 - \alpha'_k) + \omega_k^2 (I_k^2 + R_k^2) (B_1 - \tau'_k) - \omega_k^2 R_k (A_1 - \beta'_k)] = 0 \quad (3.121d)$$

$$\sum_{k=0}^m [R_k \omega_k^2 (A_0 - \alpha'_k) + I_k \omega_k^3 (A_1 - \beta'_k) + \omega_k^2 (R_k^2 + I_k^2) \sigma'_k] = \sum_{k=0}^m \omega_k^2 (R_k^2 + I_k^2) \quad (3.121e)$$

$$\sum_{k=0}^m [-I_k \omega_k^3 (A_0 - \alpha'_k) + R_k \omega_k^4 (A_1 - \beta'_k) - \omega_k^4 (R_k^2 + I_k^2) (B_1 - \tau'_k)] = 0 \quad (3.121f)$$

Cada uma destas últimas equações (3.121 a-f), contem termos, os quais são funções dos coeficientes desconhecidos, e termos que são conhecidos. Com a finalidade de condensar as notações, antes de montar o sistema de equações, definem-se as seguintes relações:

$$\lambda_h = \sum_{k=0}^m \omega_k^h \quad (3.122)$$

$$S_h = \sum_{k=0}^m \omega_k^h I_k \quad (3.123)$$

$$T_h = \sum_{k=0}^m \omega_k^h I_k \quad (3.124)$$

$$U_h = \sum_{k=0}^m \omega_k^h (R_k^2 + I_k^2) \quad (3.125)$$

Substituindo as equações (3.122 a 3.125) nas equações (3.121), e montando na forma matricial, tem-se o seguinte sistema de equações lineares:

$$\begin{pmatrix} \lambda_0 & 0 & -\lambda_2 & 0 & \lambda_4 & 0 & -\lambda_6 & \dots & T_1 & S_2 & -T_3 & -S_4 & T_5 & S_6 & -T_7 & \dots \\ 0 & \lambda_2 & 0 & -\lambda_4 & 0 & \lambda_6 & 0 & \dots & -S_2 & T_3 & S_4 & -T_5 & -S_6 & T_7 & S_8 & \dots \\ \lambda_2 & 0 & -\lambda_4 & 0 & \lambda_6 & 0 & \lambda_8 & \dots & T_3 & S_4 & -T_5 & -S_6 & T_7 & S_8 & -T_9 & \dots \\ 0 & \lambda_4 & 0 & -\lambda_6 & 0 & \lambda_8 & 0 & \dots & -S_4 & T_5 & S_6 & -T_7 & -S_8 & T_9 & S_{10} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ T_1 & -S_2 & -T_3 & S_4 & T_5 & -S_6 & \dots & \dots & U_2 & 0 & -U_4 & 0 & U_6 & \dots & \dots & \dots \\ S_2 & T_3 & -S_4 & T_5 & S_6 & T_7 & \dots & \dots & 0 & U_4 & 0 & -U_6 & 0 & \dots & \dots & \dots \\ T_3 & -S_4 & -T_5 & S_6 & T_7 & S_8 & \dots & \dots & U_4 & 0 & -U_6 & 0 & U_8 & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_0 \\ T_1 \\ S_2 \\ T_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ U_2 \\ 0 \\ \vdots \end{pmatrix}$$

A solução deste sistema, representa os coeficientes do numerador e do denominador da função de transferência aproximada.

3.4.3 Avaliação do Método

No tratamento matemático de identificação de uma função de transferência de um sistema linear e dinâmico, é usualmente bastante vantajoso tratar no domínio da frequência ao invés do domínio do tempo. O método de Levy constitui-se numa ferramenta poderosa na identificação de parâmetros de funções de transferência a partir de medidas de magnitude e fase, obtidas em forma experimental.

A aplicação deste método permite identificar funções de transferência de ordem elevada sem nenhuma dificuldade e dispensa a necessidade do conhecimento prévio da topologia da função de transferência.

Como foi explicado no capítulo 3, o método de Levy se reduz à solução de um sistema de equações lineares, permitindo-se desta maneira a sua aplicação em forma simples a técnicas computacionais. Além disso, o método é não iterativo, exigindo por isso, menor esforço computacional do que os métodos que utilizam processos iterativos, e não existe a necessidade do conhecimento de algum ponto próximo da solução para ser utilizado como ponto inicial do processo, como é o caso dos métodos iterativos. [44].

3.4.3.1 Exigências do Método

Este método para poder ser aplicado requer um conjunto de amostras da magnitude e da fase, obtidos de forma experimental, ou através de simulação. Deve-se notar que o erro pode ser facilmente minimizado considerando um maior número de pontos de amostragem na região crítica da curva. Para este método é importante ressaltar que as amostras não necessitam ser uniformemente espaçadas, como no caso de Prony.

No processo de cálculo dos coeficientes A_i 's e os B_i 's, um deles pode ser designado com um valor arbitrário; neste caso foi escolhido o coeficiente B_0 , como unitário. Esta escolha não é considerada como exigência estrita do método.

Finalmente, pode-se indicar que o método de Levy não oferece meios simples de se aferir o grau de precisão dos resultados. Uma forma de conseguir este objetivo é comparar os diagramas de Bode do modelo equivalente com o sistema real.

3.5 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados os desenvolvimentos dos diversos métodos estudados, que permitem a identificação dos parâmetros da função de transferência de sistemas de potência, e/ou a determinação de modelos equivalentes. Na parte final de cada método comentam-se as dificuldades, vantagens e desvantagem respectivas.

O capítulo 4 trata as aplicações de cada um destes métodos no projeto de estabilizadores de potência.

CAPÍTULO 4

Aplicação dos Modelos Equivalentes no Projeto de ESP's

4.1 Introdução

Os métodos de redução de ordem e/ou identificação de sistemas dinâmicos, formalizados no capítulo anterior, são de muita utilidade para diferentes aplicações em sistemas de potência, especialmente em sistemas de grande porte, nos quais têm-se dificuldades computacionais e de implementação. Justifica-se ainda o uso dos modelos reduzidos em sistemas de grande porte, pela quantidade de informação a ser considerada. Através destes métodos de redução, é possível conhecer o comportamento dinâmico "aproximado em algum sentido" do sistema de potência, facilitando-se assim o projeto de diferentes controladores para o mencionado sistema.

Neste capítulo são obtidos os modelos reduzidos para dois sistemas de potência, através dos métodos estudados no capítulo anterior. Descreve-se também o projeto de ESP's, usando-se as funções de transferência dos modelos equivalentes de ordem reduzida para os sistemas de potência analisados. Os dois sistemas acima mencionados são: o sistema 1, que possui três geradores, nove barras e nove linhas [11], e o sistema 2, que tem treze geradores, 77 barras e 81 linhas, o qual representa um sistema simplificado das regiões Sul-Sudeste brasileiro [Apêndice A].

Com o objetivo de obter modelos equivalentes de ordem reduzida dos sistemas de potência acima, a fim de realizar o projeto de ESP's, foram implementados os seguintes programas [Apêndice B]:

a) Programa PRONY [Apêndice B], usando-se linguagem Fortran. Este programa permite identificar a função de transferência na forma de pólos e resíduos, usando o algoritmo proposto em [3,5,6], sendo que esta função de transferência é de ordem reduzida .

b) Programa HAN [Apêndice B], usando-se linguagem Fortran. Este programa permite reduzir a ordem de um sistema dinâmico, linear, invariante no tempo e assintoticamente estável, através dos métodos de Moore e da ótima norma de Hankel, usando os algoritmos propostos por Moore e Glover [23,24].

c) Programa FORE (Freq. Order Reduction) [Apêndice B], também em linguagem Fortran. Este programa permite identificar a função de transferência na forma de um quociente de polinômios, usando como algoritmo a metodologia de Levy [29,30].

Para testar os métodos nas respectivas aplicações, foram usados os seguintes programas para sistemas de potência: o SIM [46.], que permite realizar simulações não lineares; o FREQ [46.], através do qual pode-se simular a resposta em frequência e o EIGEN [46.], que calcula os fatores de participação e índices de localização.

A descrição resumida de todos os programas implementados, encontra-se no Apêndice B.

4.2 Aplicações a Sistemas de Potência

Conforme descrito anteriormente, as técnicas de identificação e/ou redução de ordem desenvolvidas neste trabalho foram aplicadas ao projeto de ESP's para

dois sistemas elétricos de potência. A descrição deles e as aplicações são detalhadas na próxima seção.

4.2.1 Sistema 1

O primeiro sistema considerado constitui-se de três máquinas síncronas, nove barras e nove linhas [11], (ver Fig. A1 no Apêndice A). A ordem deste sistema é 12. Os geradores das barras 2 e 3 são modelados através do modelo 3 de máquina [50]. O gerador da barra 1 tem modelo de máquina 1 (modelo clássico), e neste estudo é usado como referência. Os geradores 2 e 3 têm reguladores automáticos de tensão modelo ST1 [IEEE], representado na figura 4.1. Os dados de carga, as condições iniciais das máquinas síncronas e dos controladores são apresentados no Apêndice A.

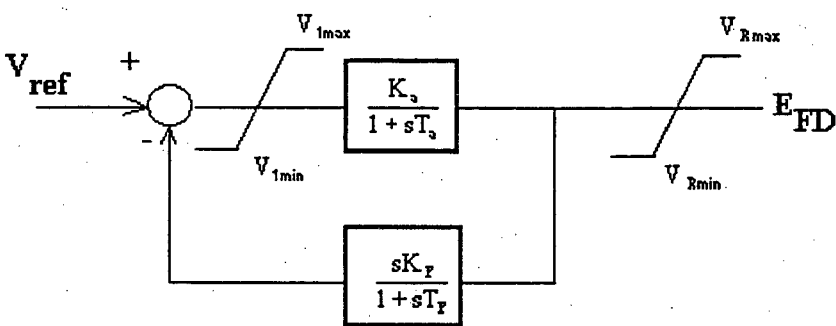


Figura 4.1 Modelo do Regulador Automático de Tensão (RAT) (IEEE modelo ST1)

Os dados dos reguladores automáticos de tensão aplicados nos geradores 1 e 2 são mostrados na tabela 4.1.

| K_a | T_a | K_F | T_F | V_{1min} | V_{1max} | V_{Rmin} | V_{Rmax} |
|--------|-------|-------|-------|------------|------------|------------|------------|
| 25.000 | 0.200 | 0.100 | 1.000 | -5.000 | 5.000 | -5.000 | 5.000 |

Tabela 4.1 Dados dos RAT's dos Geradores 1 e 2, do sistema 1

Na aplicação ao projeto de ESP's, é importante que os modelos equivalentes identifiquem com alguma aproximação, principalmente os modos eletromecânicos. Com a finalidade de comparar, os autovalores do sistema 1 foram obtidos através de simulação computacional usando o programa EIGEN [46], e são mostrados na tabela 4.2. Estes resultados permitem comparar os autovalores obtidos através dos métodos de identificação e/ou redução estudados, como será mostrado posteriormente. Os modos eletromecânicos estão representados pelos autovalores 3-4 e 5-6, respectivamente. O sistema real é de 12ª ordem.

| # | AUTOVALORES | Amortecimento $\xi(\%)$ |
|-------|-------------------|----------------------------|
| 1 | -17,8444+j 0,0000 | |
| 2 | -17,5420+j 0,0000 | |
| 3-4 | -0,6991±j 12,7334 | 5,48 |
| 5-6 | -0,0980±j 7,0173 | 1,39 |
| 7 | -5,2863+j 0,0000 | |
| 8 | -3,6415+j 0,0000 | |
| 9-10 | -0,5040±j 0,6857 | 59,22 |
| 11-12 | -0,3446±j 0,3982 | 65,44 |

Tabela 4.2 - Autovalores em malha aberta para o sistema 1, obtidos através de simulação computacional.

Para identificar a função de transferência do sistema 1, através do método de Prony, é necessário primeramente selecionar um sinal de entrada. A entrada escolhida para este sistema é aplicada no gerador 2. Ela consiste de um pulso de onda quadrada, de baixa amplitude, como mostrado na figura 4.2. A descrição desta entrada, usando a equação (3.22), resulta em $k=1$, $c_0 = 0.02$, $c_1 = -0.02$, $D_0 = 0$, $D_1 = 0.5$, e $\lambda_{n+1} = 0$.

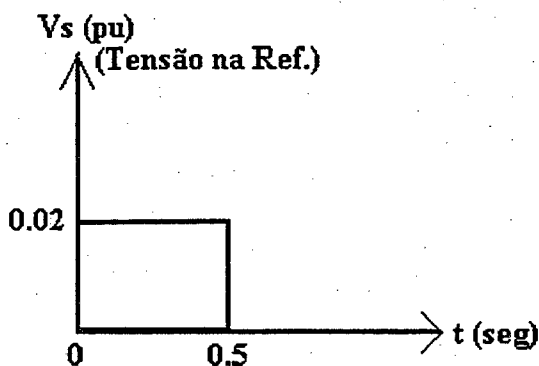


Fig. 4.2. Sinal de entrada aplicado no gerador 2 do Sistema 1, para obter a função de transferência pelo método Prony.

Neste caso, o sinal foi aplicado no gerador 2, excitando desta maneira os modos pouco amortecidos fortemente associados a este gerador. Afim de testar a eficiência do método, foi feita a identificação da função de transferência do sistema 1 para quinta, sétima e nona ordens. Deve-se destacar que pela experiência do autor deste trabalho, a melhor aproximação obtida através do método de Prony ao se aplicar as equações (3.38) e (3.44) foi considerando duas a três linhas mais que colunas nas respectivas equações. Os autovalores correspondentes em malha aberta, resultantes da aproximação do método são apresentados nas tabelas 4.3, 4.4 e 4.5, respectivamente.

Com relação aos métodos de Moore e a mínima norma de Hankel, é necessário fornecer o sistema de estado (A,B,C,D), equações (3.47) e (3.48), do sistema 1. O grau k requerido para a aproximação, será escolhido de acordo com o critério dos valores singulares de Hankel. O mencionado sistema de estado foi obtido através de simulação computacional (Programa EIGEN [46].), tendo como entrada a tensão de referência V_{f12} , e como saída a velocidade do gerador 2, ω_2 (Ref. Apêndice A).

Os dados necessários para o método de Levy, representam a resposta em frequência do sistema 1, (equação (3.100)). Esta informação foi de igual maneira obtida através de simulação computacional, usando o programa FREQ [46].

São apresentadas a seguir as tabelas 4.3(a-b), 4.4(a-b) e 4.5(a-b), que mostram os autovalores em malha aberta, conseguidos através dos métodos de identificação/redução de ordem estudados. As mencionadas tabelas, apresentam os pólos identificados do sistema 1, para quinta, sétima e nona ordem, respectivamente.

| Método de Hankel | Amortecimento $\xi(\%)$ | Método de Moore | Amortecimento $\xi(\%)$ |
|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|
| $-2,2076 \pm j12,4618$ | 17,44 | $-0,8194 \pm j11,9869$ | 6,82 |
| $-0,1644 \pm j7,0036$ | 2,34 | $-0,0994 \pm j7,0153$ | 1,42 |
| -0,4673 | | -0,1528 | |

Tabela 4.3 (a) Autovalores em malha aberta do sistema 1, identificados pelos métodos de Hankel e Moore. Aproximação de quinta ordem.

| Método de Levy | Amortecimento $\xi(\%)$ | Método de Prony | Amortecimento $\xi(\%)$ |
|------------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| $-0,6489 \pm j12,6583$ | 5,12 | $-0,4170 \pm j0,6259$ | 55,4 |
| $-0,1009 \pm j7,0091$ | 1,43 | $-0,0975 \pm j7,0171$ | 1,39 |
| -37,4355 | | -5,7630 | |

Tabela 4.3 (b) Autovalores em malha aberta do sistema 1, identificados pelos métodos de Levy e Prony. Aproximação de quinta ordem.

Comparando-se as tabelas 4.2 e 4.3(a-b), verifica-se que os autovalores 3-4, 5-6 são identificados com alguma precisão pelos métodos de Hankel, Moore e Levy, destacando-se o método de Levy pela melhor aproximação. O método de Prony identifica os autovalores 5-6, 11-12, e 7. Para ter uma apreciação melhor das aproximações, foram obtidas as respostas em frequência (diagramas de Bode), mostradas nas figuras 4.3(a-b), 4.4(a-b), 4.5(a-b), e 4.6(a-b), respectivamente.

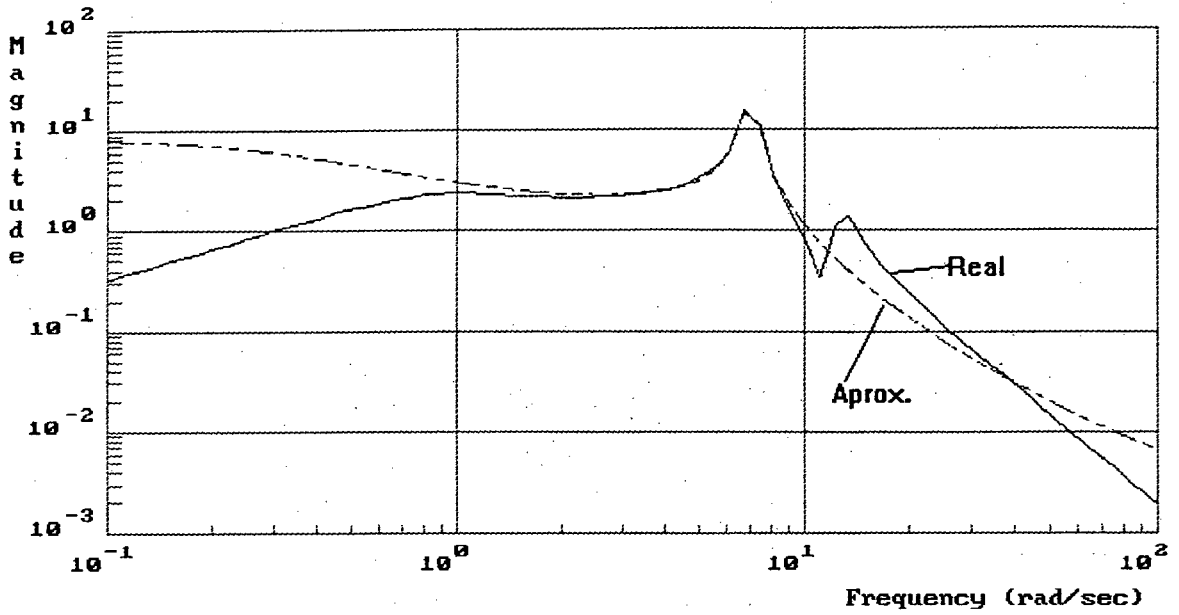


Fig 4.3 (a) Diagrama de amplitude em coordenadas de Bode relativos à função de transferência do sistema de 3 máquinas, 9 barras [11], com a função de transferência aproximada de 5ª ordem, via Prony.

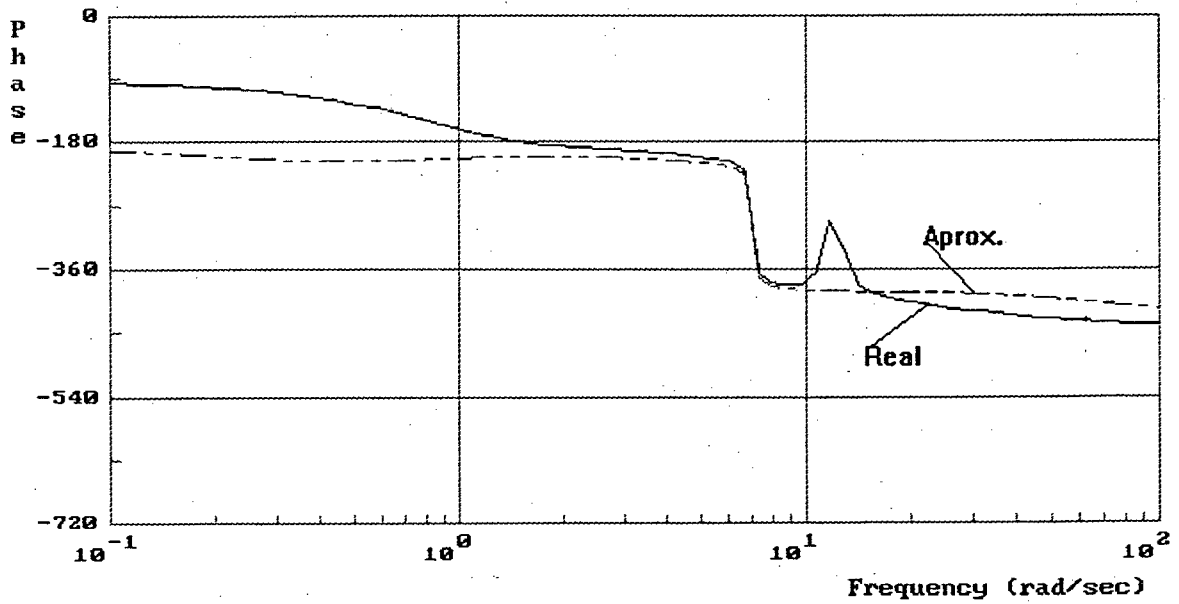


Fig 4.3 (b) Diagrama de fase em coordenadas de Bode relativos à função de transferência do sistema de 3 máquinas, 9 barras [11], com a função de transferência aproximada de 5ª ordem, via Prony.

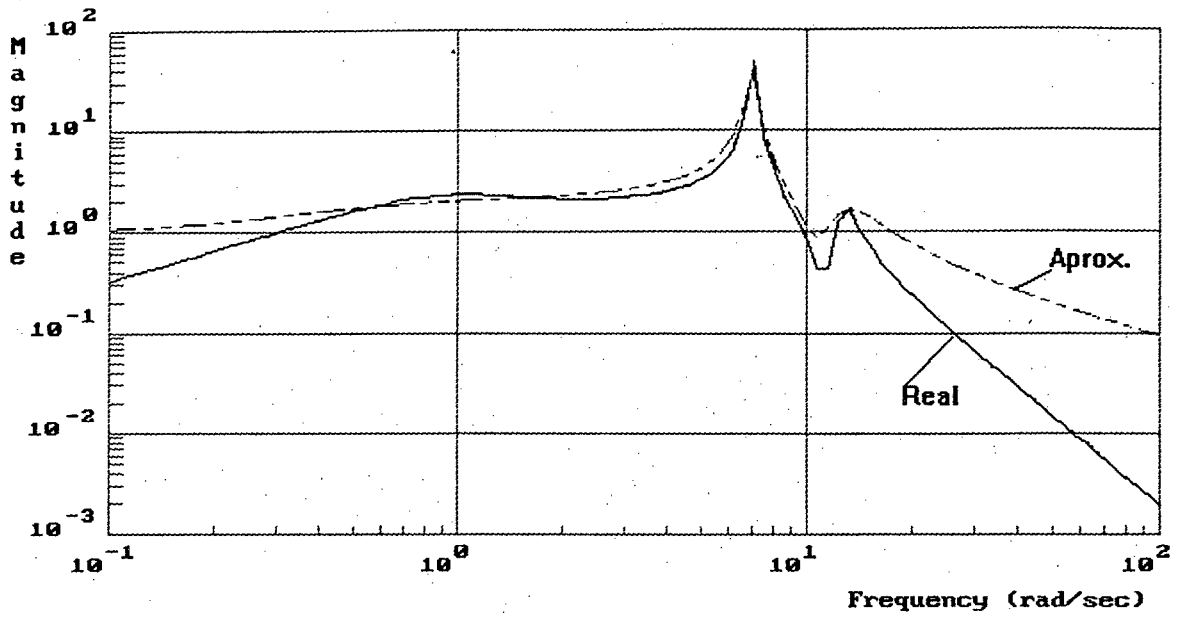


Fig 4.4 (a) Diagrama de magnitude em coordenadas de Bode relativos à função de transferência do sistema de 3 máquinas, 9 barras [11], com a função de transferência aproximada de 5ª. ordem, via Hankel.

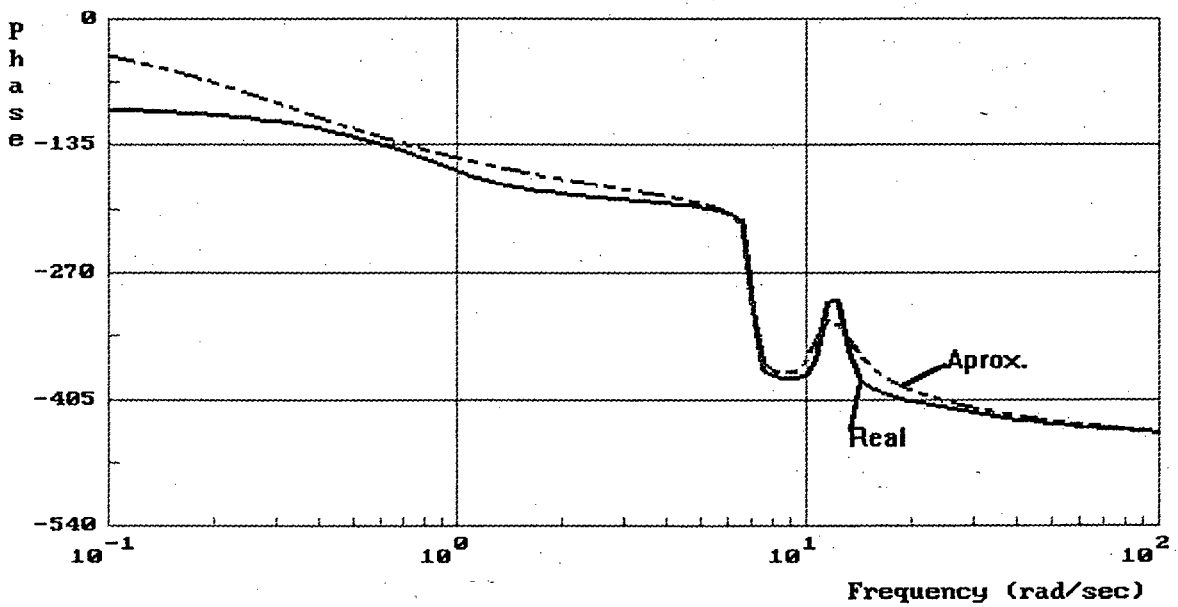


Fig 4.4 (b) Diagrama de fase em coordenadas de Bode relativos à função de transferência do sistema de 3 máquinas, 9 barras [11], com a função de transferência aproximada de 5ª. ordem, via Hankel.

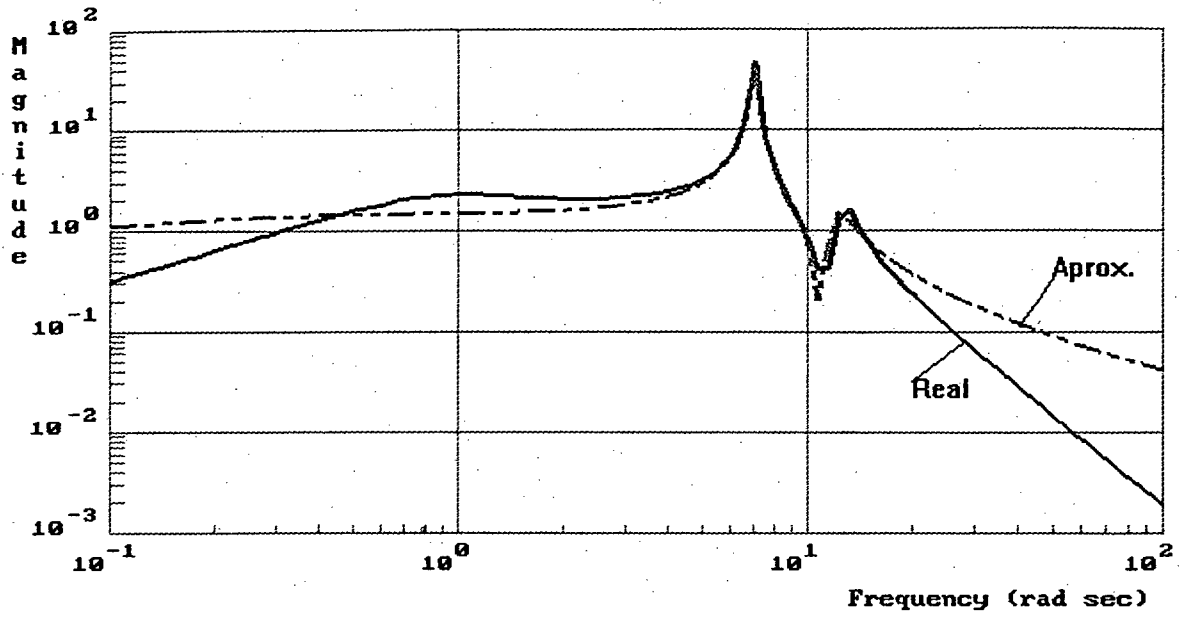


Fig 4.5 (a) Diagrama de magnitude em coordenadas de Bode relativos à função de transferência do sistema de 3 máquinas, 9 barras [11], com a função de transferência aproximada de 5ª. ordem, via Moore.

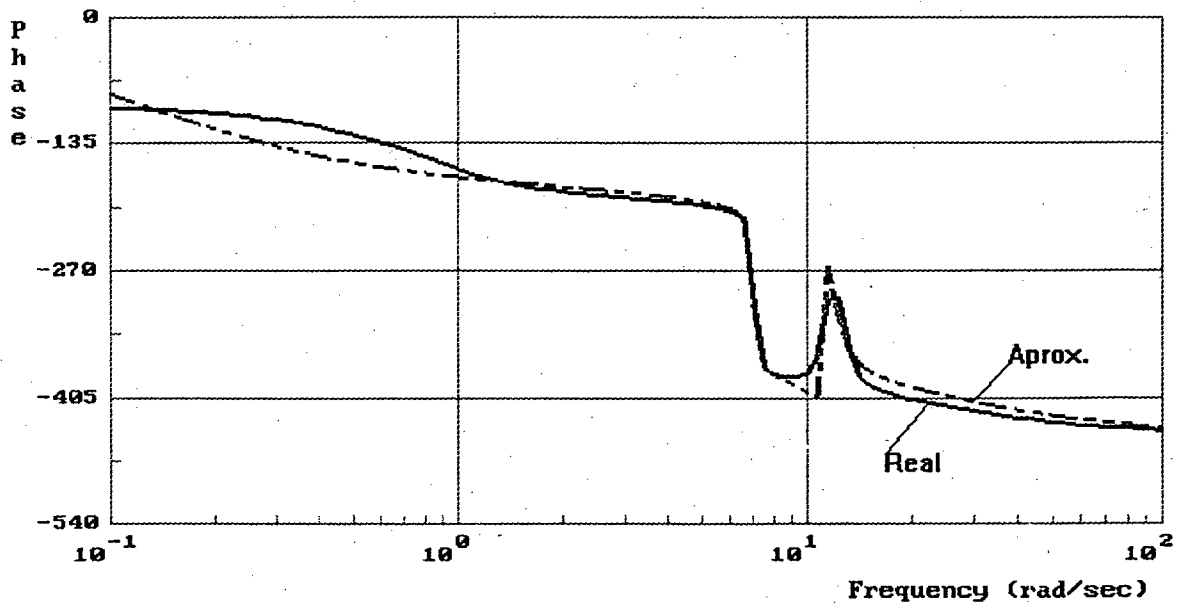


Fig 4.5 (b) Diagrama de fase em coordenadas de Bode relativos à função de transferência do sistema de 3 máquinas, 9 barras [11], com a função de transferência aproximada de 5ª. ordem, via Moore.

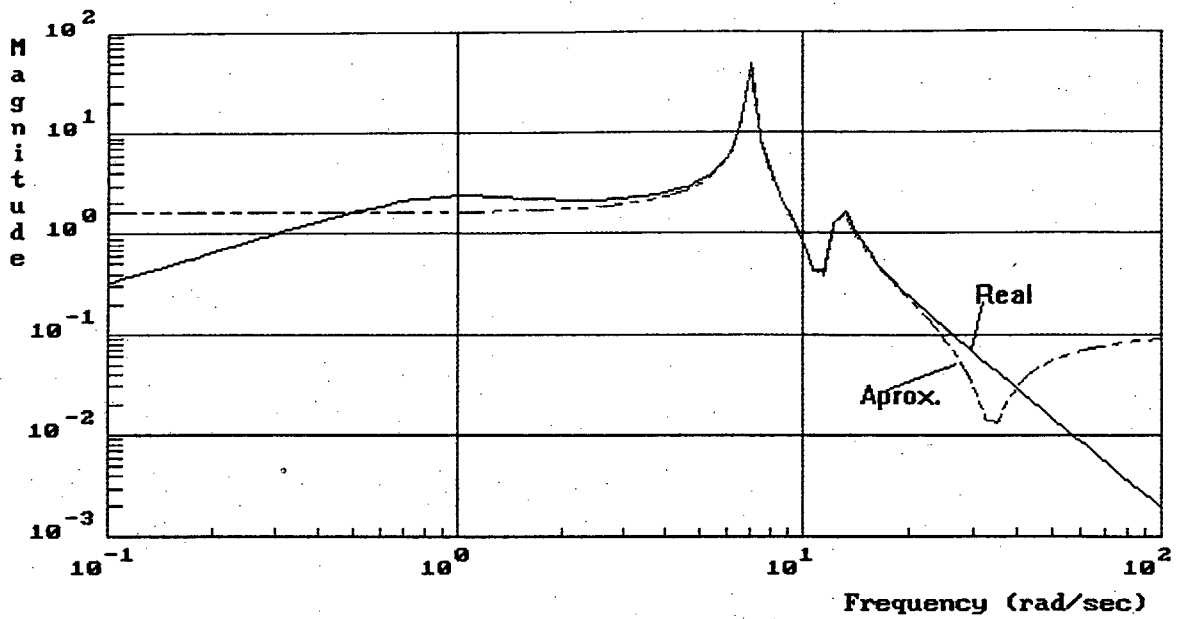


Fig 4.6 (a) Diagrama de magnitude em coordenadas de Bode relativos à função de transferência do sistema de 3 máquinas, 9 barras [11], com a função de transferência aproximada de 5ª. ordem, via Levy.

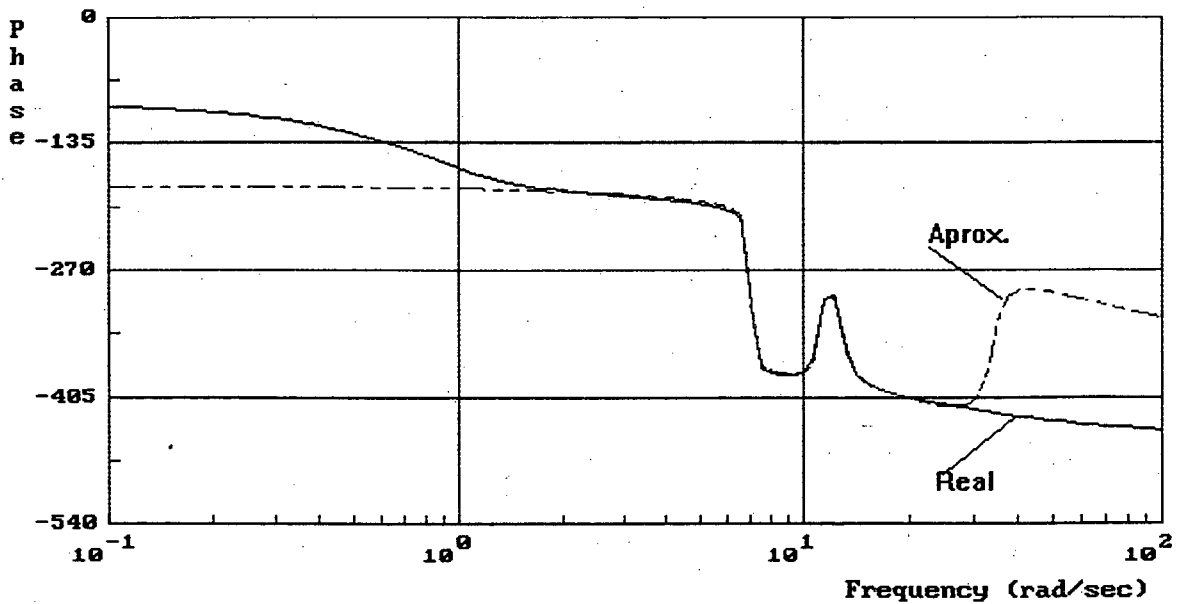


Fig 4.6 (b) Diagrama de fase em coordenadas de Bode relativos à função de transferência do sistema de 3 máquinas, 9 barras [11], com a função de transferência aproximada de 5ª. ordem, via Levy.

| Método de Hankel | Amortecimento $\xi(\%)$ | Método de Moore | Amortecimento $\xi(\%)$ |
|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|
| $-0,5448 \pm j12,7237$ | 4,28 | $-0,7000 \pm j12,7337$ | 5,49 |
| $-0,0701 \pm j7,0209$ | 0,99 | $-0,0979 \pm j7,0169$ | 1,39 |
| $-0,2903 \pm j0,7814$ | 34,82 | $-0,5817 \pm j0,5975$ | 69,76 |
| -14,2921 | | -17,2000 | |

Tabela 4.4 (a) Autovalores em malha aberta do sistema 1, identificados pelos métodos de Hankel e Moore. Aproximação de sétima ordem.

| Método de Levy | Amortecimento $\xi(\%)$ | Método de Prony | Amortecimento $\xi(\%)$ |
|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|
| $-0,6992 \pm j12,7330$ | 5,48 | $-0,7553 \pm j12,4550$ | 6,05 |
| $-0,0979 \pm j7,0172$ | 1,39 | $-0,0988 \pm j7,019j$ | 1,40 |
| $-0,6079 \pm j0,5851$ | 72,05 | $-0,5020 \pm j0,5959$ | 64,43 |
| -17,3363 | | -4,1809 | |

Tabela 4.4 (b) Autovalores em malha aberta do sistema 1, identificados pelos métodos de Levy e Prony. Aproximação de sétima ordem.

Comparando-se a tabela 4.2 com as tabelas 4.4a e 4.4b pode-se concluir que os modos eletromecânicos são aproximados com bastante precisão, destacando-se os métodos de Moore, Levy e Prony. Da mesma maneira que no caso anterior, também foram realizados os diagramas de Bode, que permitem apreciar melhor as aproximações. Os mencionados diagramas encontram-se nas figuras 4.7(a-b), 4.8(a-b), 4.9(a-b), e 4.10(a-b), respectivamente.

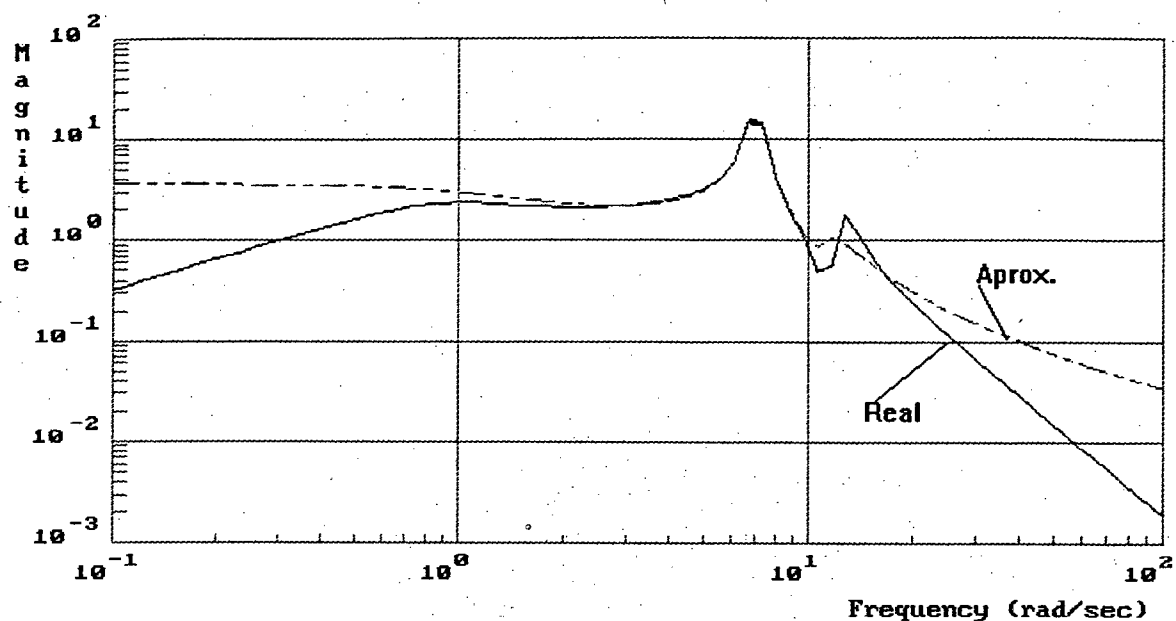


Fig 4.7 (a) Diagrama de magnitude em coordenadas de Bode relativos à função de transferência do sistema de 3 máquinas, 9 barras [11], com a função de transferência aproximada de 7ª. ordem, via Prony.

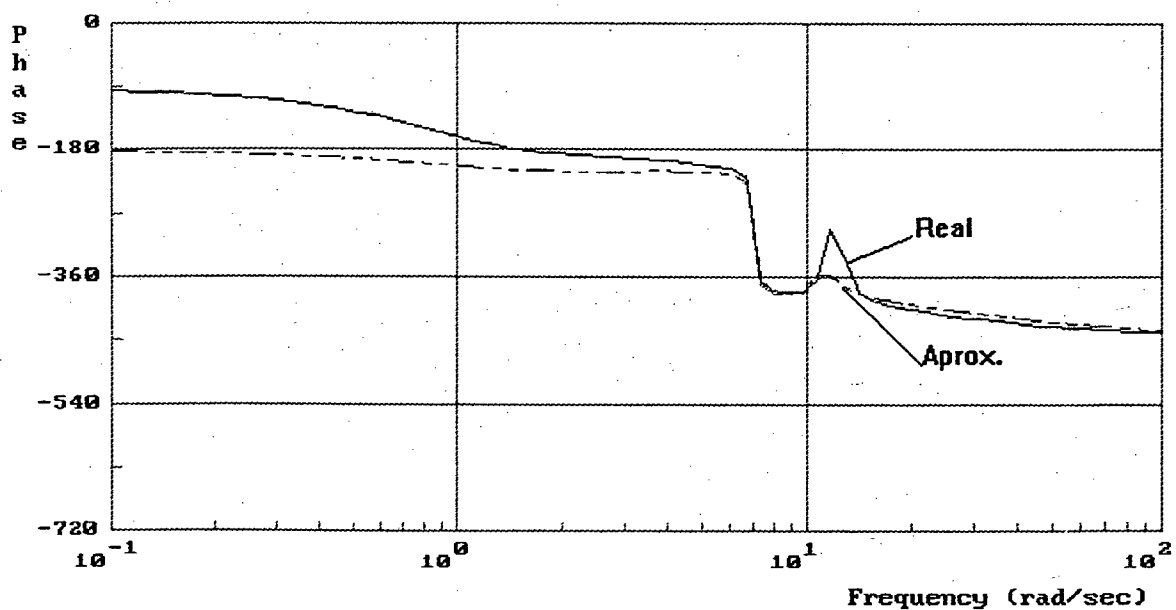


Fig 4.7 (b) Diagrama de fase em coordenadas de Bode relativos à função de transferência do sistema de 3 máquinas, 9 barras [11], com a função de transferência aproximada de 7ª. ordem, via Prony.

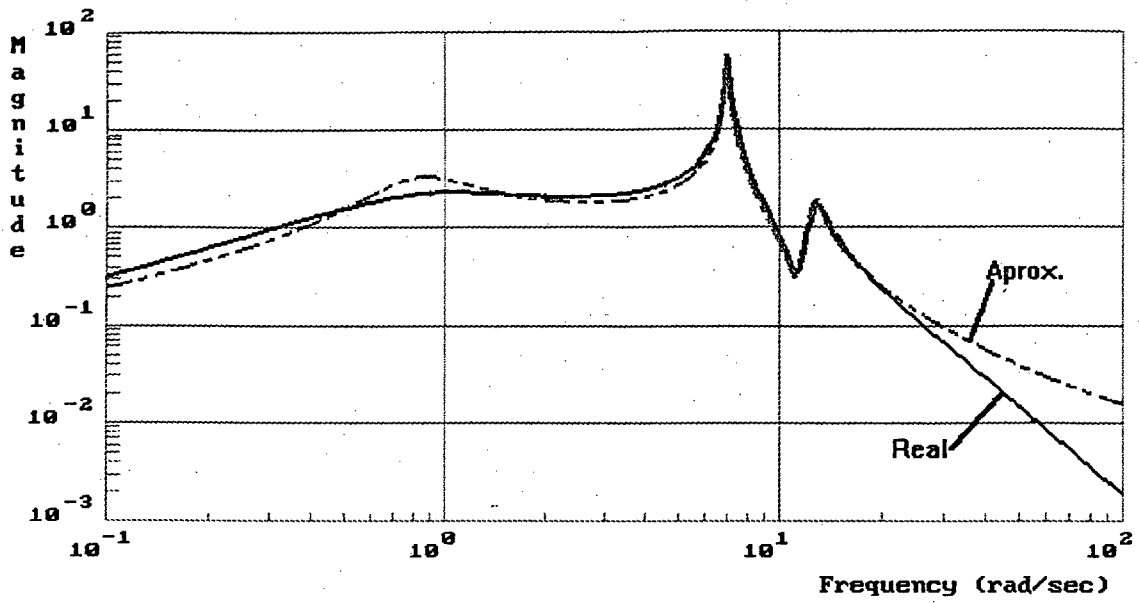


Fig 4.8 (a) Diagrama de magnitude em coordenadas de Bode relativos à função de transferência do sistema de 3 máquinas, 9 barras [11], com a função de transferência aproximada de 7ª. ordem, via Hankel.

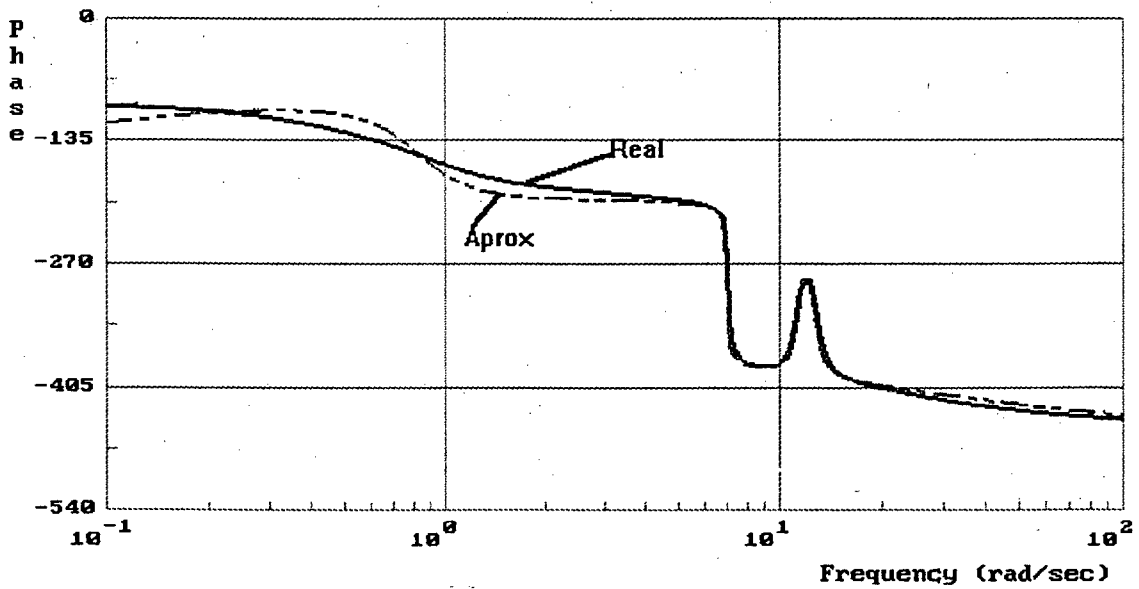


Fig 4.8 (b) Diagrama de fase em coordenadas de Bode relativos à função de transferência do sistema de 3 máquinas, 9 barras [11], com a função de transferência aproximada de 7ª. ordem, via Hankel.

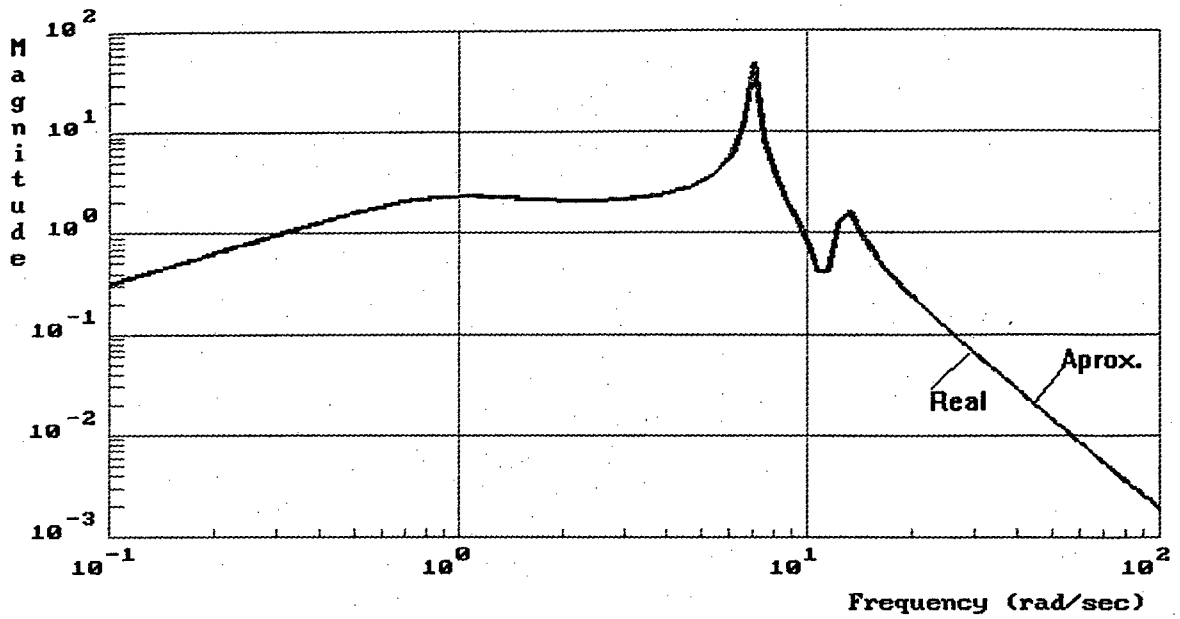


Fig 4.9 (a) Diagrama de magnitude em coordenadas de Bode relativos à função de transferência do sistema de 3 máquinas, 9 barras [11], com a função de transferência aproximada de 7ª. ordem, via Moore.

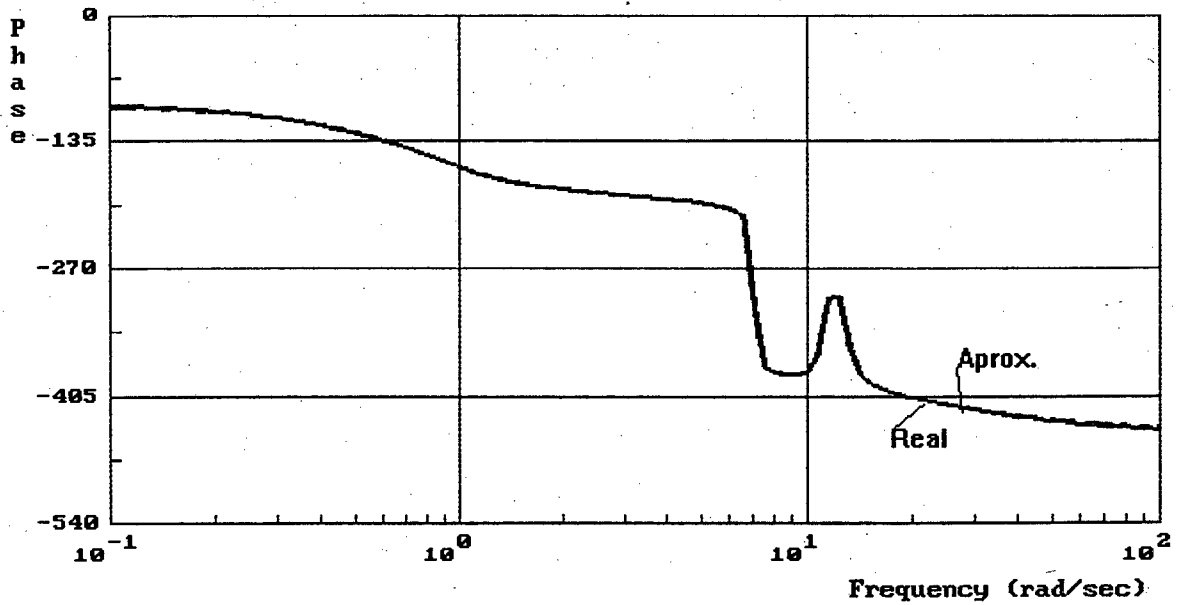


Fig 4.9 (b) Diagrama de fase em coordenadas de Bode relativos à função de transferência do sistema de 3 máquinas, 9 barras [11], com a função de transferência aproximada de 7ª. ordem, via Moore.

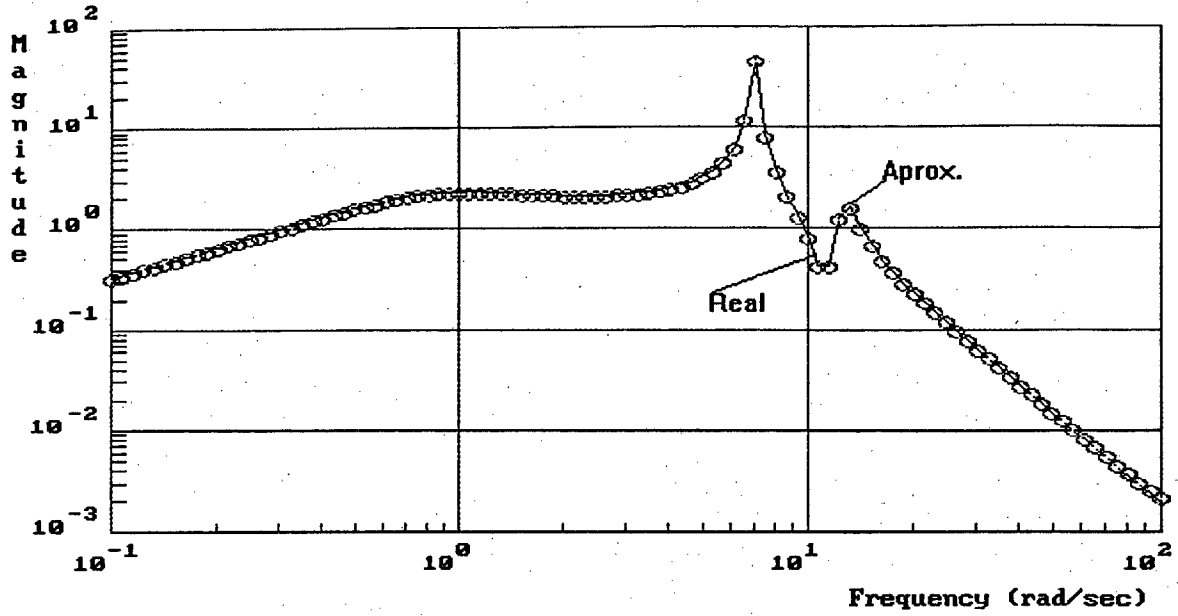


Fig 4.10 (a) Diagrama de magnitude em coordenadas de Bode relativos à função de transferência do sistema de 3 máquinas, 9 barras [11], com a função de transferência aproximada de 7ª. ordem, via Levy.

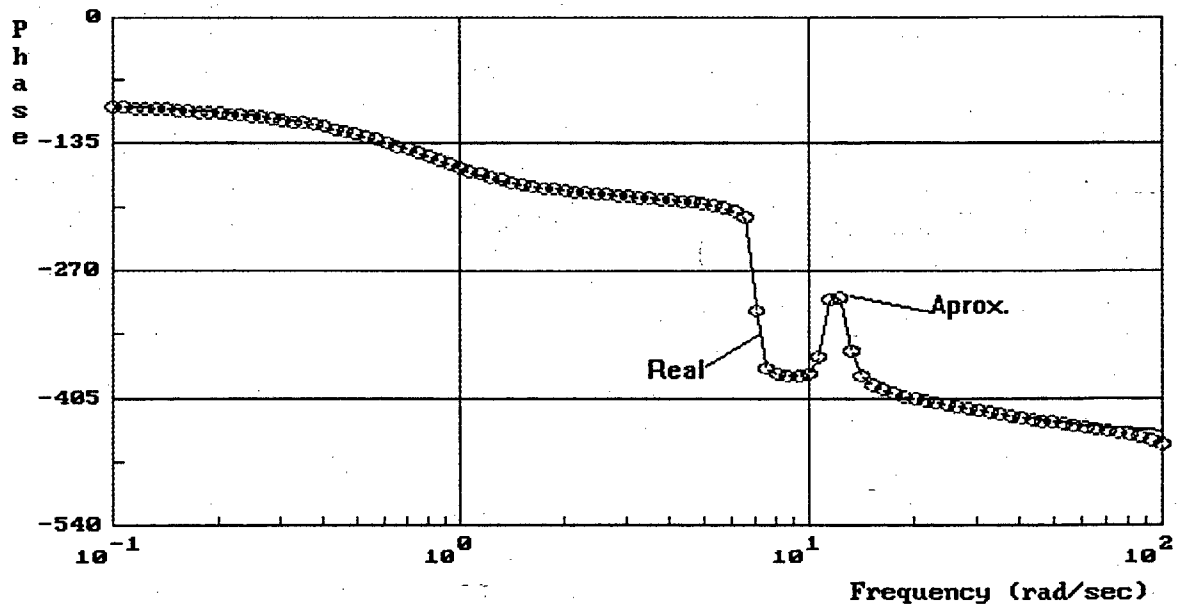


Fig 4.10 (b) Diagrama de fase em coordenadas de Bode relativos à função de transferência do sistema de 3 máquinas, 9 barras [11], com a função de transferência aproximada de 7ª. ordem, via Levy.

| Método de Hankel | Amortecimento $\xi(\%)$ | Método de Moore | Amortecimento $\xi(\%)$ |
|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|
| $-0,6897 \pm j12,7395$ | 5,40 | $-0,7006 \pm j12,7348$ | 5,49 |
| $-0,0964 \pm j7,0178$ | 1,37 | $-0,0980 \pm j7,0169$ | 1,39 |
| $-0,5130 \pm j0,6958$ | 59,34 | $-0,5395 \pm j0,6052$ | 66,54 |
| $-0,2594 \pm j0,4722$ | 48,14 | $-0,2262 \pm j0,5611$ | 37,40 |
| -16,5196 | | -17,0494 | |

Tabela 4.5 (a) Autovalores em malha aberta do sistema 1, identificados pelos métodos de Hankel e Moore. Aproximação de nona ordem.

| Método de Levy | Amortecimento $\xi(\%)$ | Método de Prony | Amortecimento $\xi(\%)$ |
|-------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|
| $-0,6995 \pm j12,7335j$ | 5,48 | $-0,7163 \pm j12,6782$ | 5,64 |
| $-0,0980 \pm j7,0173j$ | 1,39 | $-0,0986 \pm j7,0155$ | 1,41 |
| $-0,5831 \pm j0,5952j$ | 69,98 | $-1,0877 \pm j7,0810$ | 15,18 |
| $-2,4750 \pm j20,8999j$ | 11,46 | $-0,4373 \pm j0,6540$ | 55,58 |
| -17,0112 | | -9,0345 | |

Tabela 4.5 (b) Autovalores em malha aberta do sistema 1, identificados pelos métodos de Levy e Prony. Aproximação de nona ordem.

De acordo com o critério da mínima norma de Hankel, a melhor aproximação deste exemplo deve ser de ordem nove, como mostrado na tabela 4.5(a-b). Pelos resultados mostrados na mencionada tabela, nota-se a excelente aproximação conseguida pelos quatro métodos considerados. As respostas em frequência, através dos diagramas de Bode para os quatro métodos, são mostrados nas figuras 4.11(a-b), 4.12(a-b), 4.13(a-b), e 4.14(a-b), respectivamente.

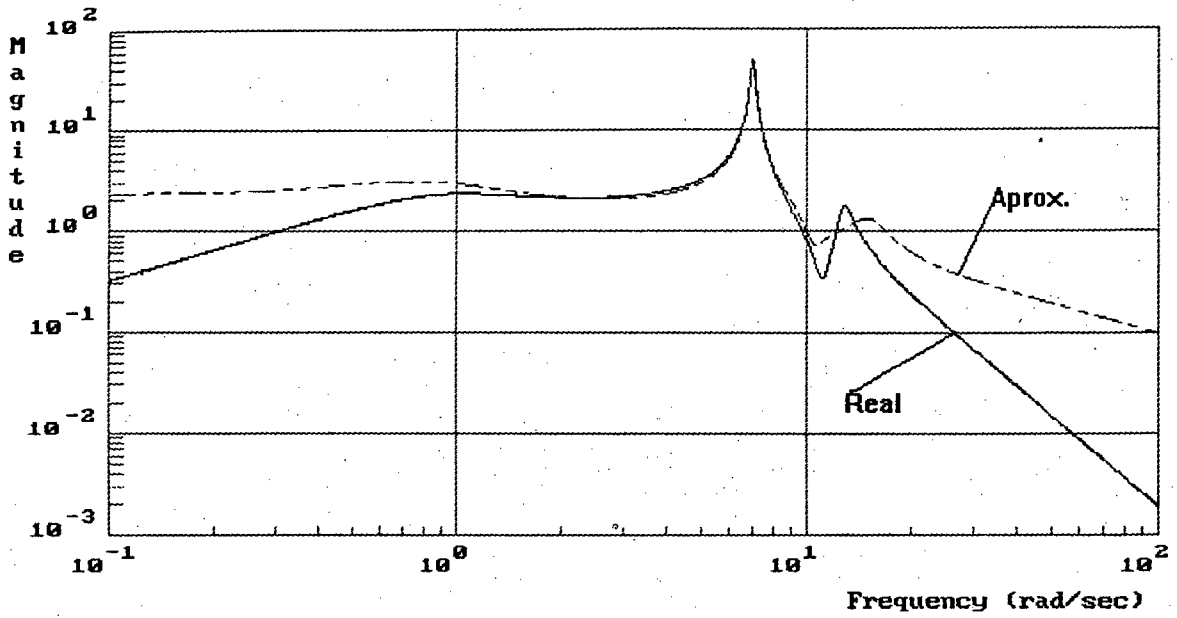


Fig 4.11 (a) Diagrama de magnitude em coordenadas de Bode relativos à função de transferência do sistema de 3 máquinas, 9 barras [11], com a função de transferência aproximada de 9ª. ordem, via Prony.

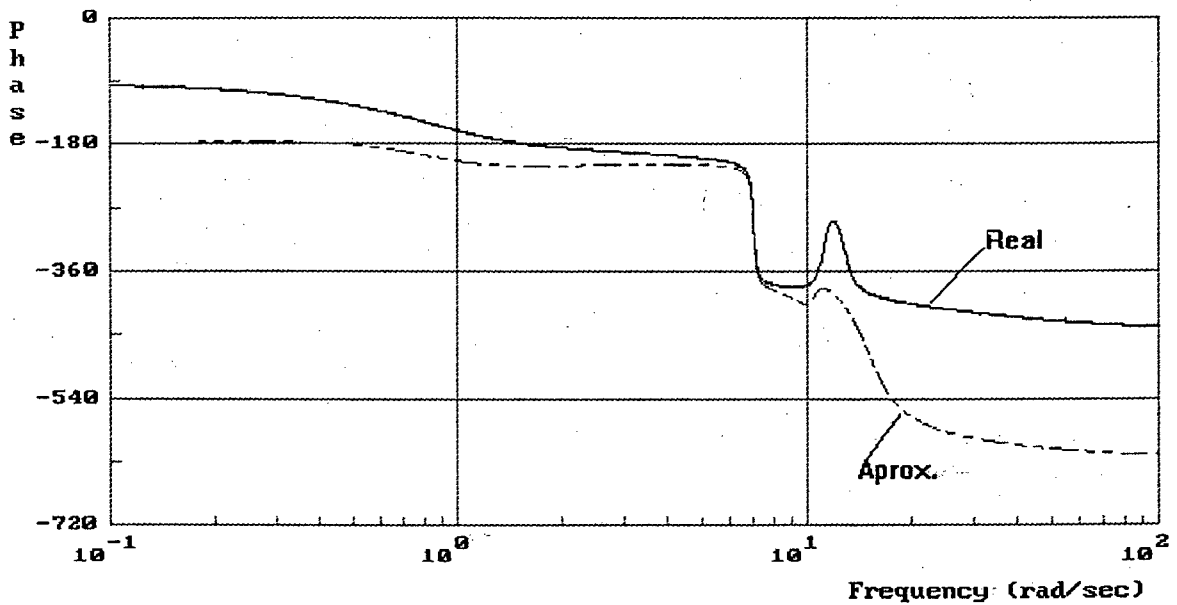


Fig 4.11 (b) Diagrama de fase em coordenadas de Bode relativos à função de transferência do sistema de 3 máquinas, 9 barras [11], com a função de transferência aproximada de 9ª. ordem, via Prony.

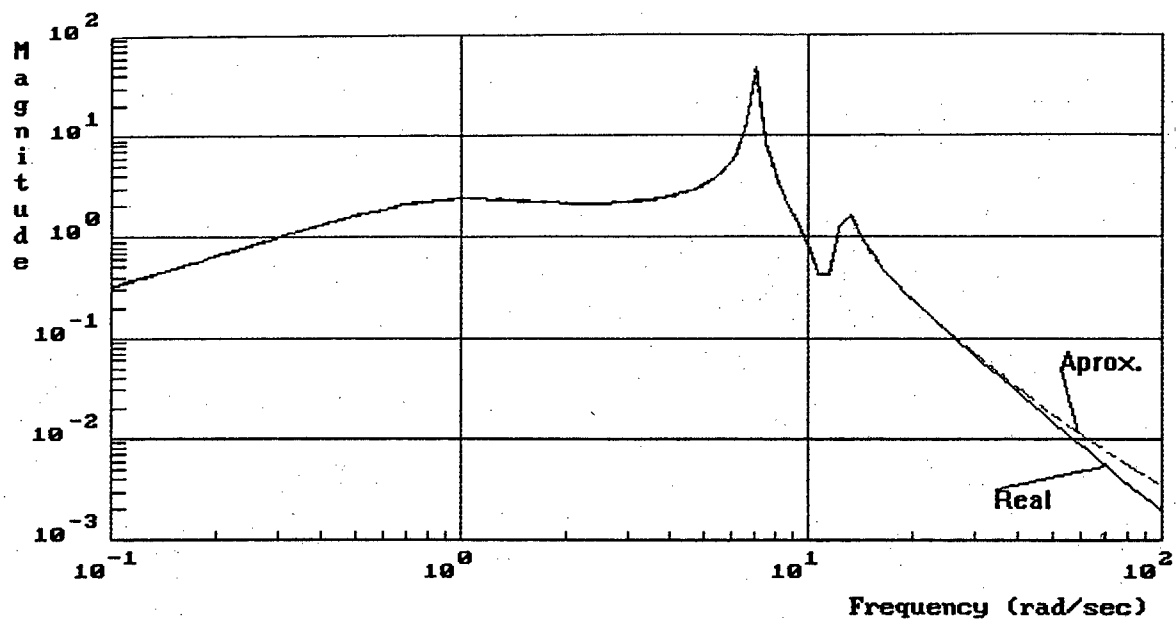


Fig 4.12 (a) Diagrama de magnitude em coordenadas de Bode relativos à função de transferência do sistema de 3 máquinas, 9 barras [11], com a função de transferência aproximada de 9ª. ordem, via Hankel.

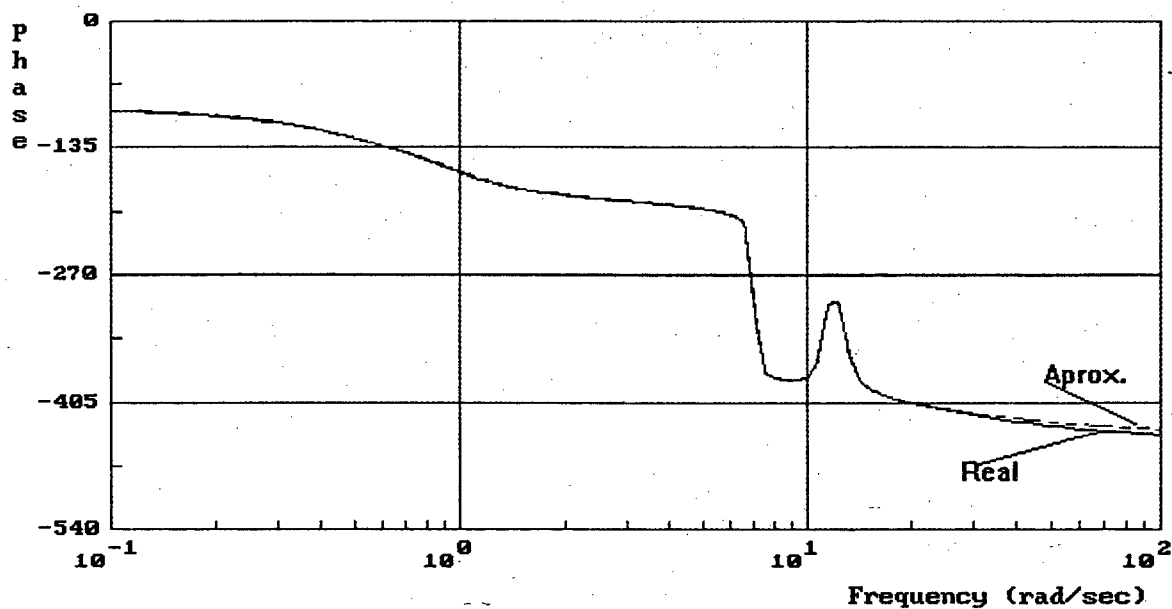


Fig 4.12 (b) Diagrama de fase em coordenadas de Bode relativos à função de transferência do sistema de 3 máquinas, 9 barras [11], com a função de transferência aproximada de 9ª. ordem, via Hankel.

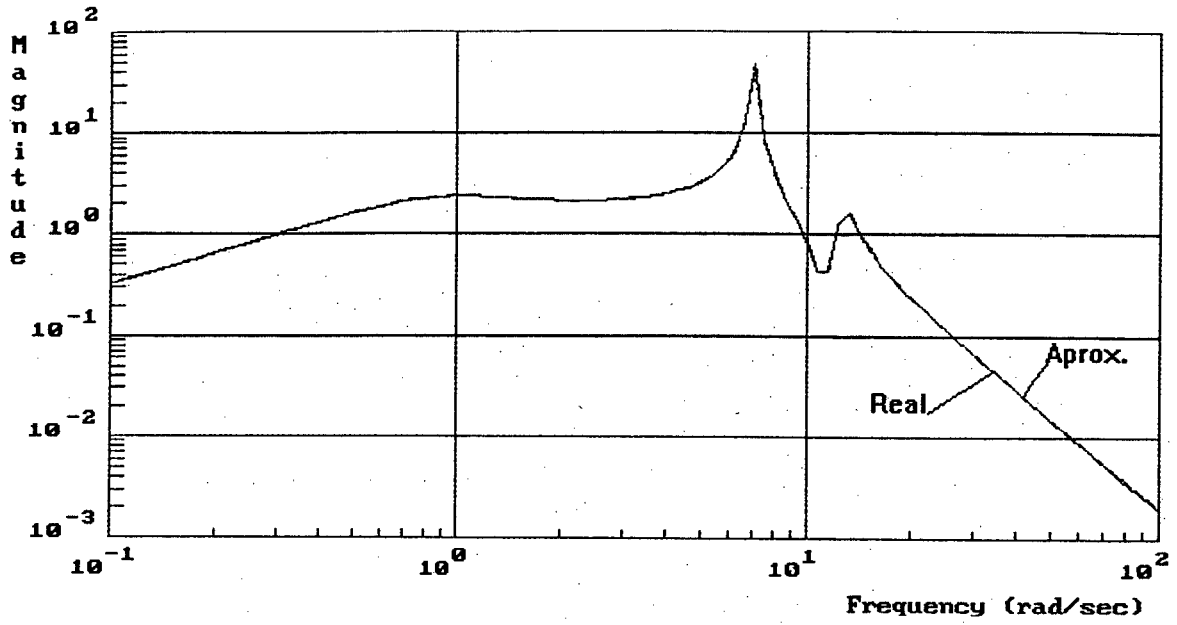


Fig 4.13 (a) Diagrama de magnitude em coordenadas de Bode relativos à função de transferência do sistema de 3 máquinas, 9 barras [11], com a função de transferência aproximada de 9ª. ordem, via Moore.

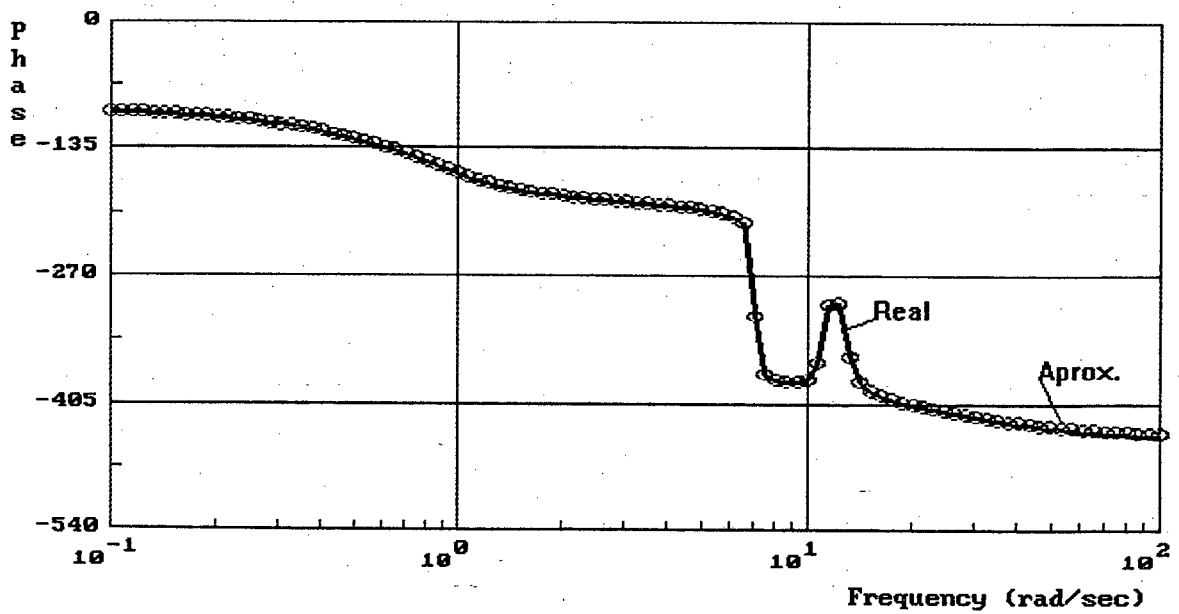


Fig 4.13 (b) Diagrama de fase em coordenadas de Bode relativos à função de transferência do sistema de 3 máquinas, 9 barras [11], com a função de transferência aproximada de 9ª. ordem, via Moore.

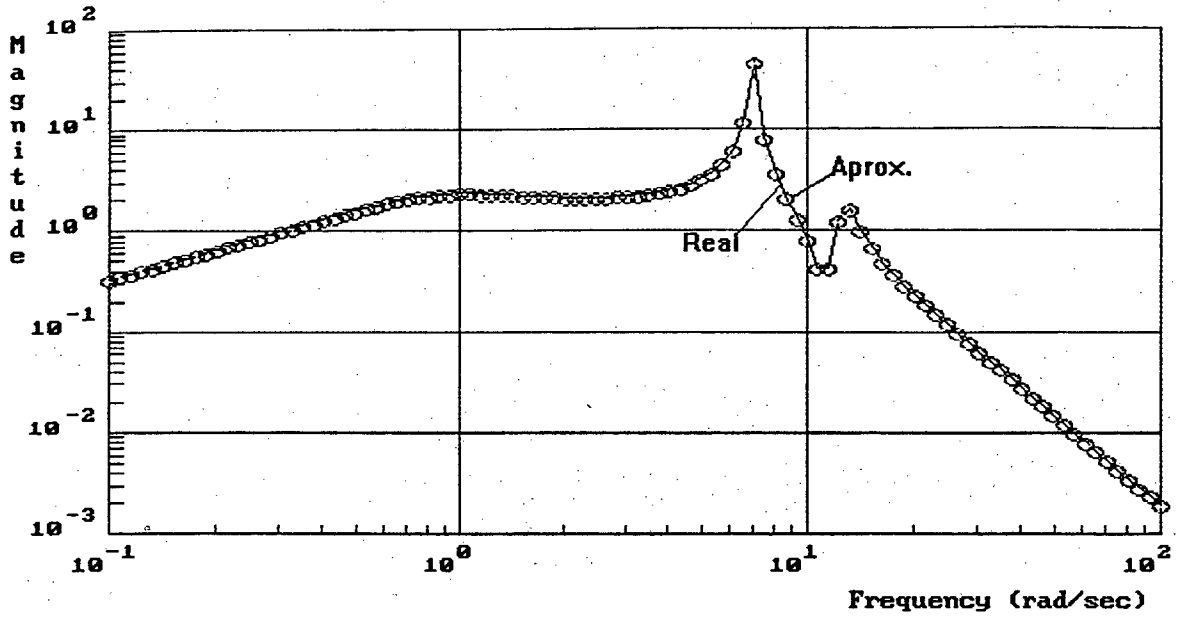


Fig 4.14 (a) Diagrama de magnitude em coordenadas de Bode relativos à função de transferência do sistema de 3 máquinas, 9 barras [11], com a função de transferência aproximada de 9ª. ordem, via Levy.

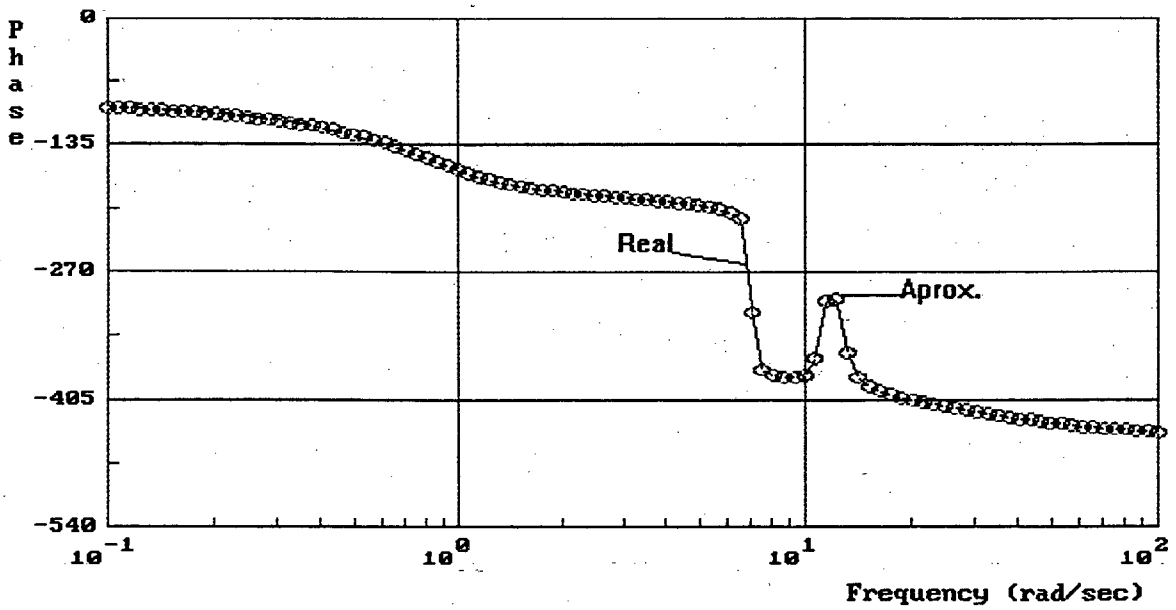


Fig 4.14 (b) Diagrama de fase em coordenadas de Bode relativos à função de transferência do sistema de 3 máquinas, 9 barras [11], com a função de transferência aproximada de 9ª. ordem, via Levy.

4.2.1.1 Projeto do ESP para o Sistema 1

Esta parte do trabalho apresenta os resultados do projeto dos ESP's para o sistema 1, utilizando para isto os sistemas equivalentes obtidos através dos métodos de redução e/ou identificação. Vale salientar que o uso de sistemas equivalentes não é restrito a projetos de ESP's, podendo também ser utilizados em diversos projetos de controladores.

Deseja-se projetar ESP's para melhorar os amortecimentos dos modos eletromecânicos, sem degradar o amortecimento dos outros modos.

Dependendo do caso, o ESP será aplicado a uma ou mais máquinas. Conseqüentemente é necessário determinar a melhor máquina, na qual deve-se aplicar o ESP. Alguns critérios para conseguir isto foram discutidos na secção 2.3.4. Neste trabalho foi utilizado o método dos fatores de participação. Para este exemplo em particular, o maior fator de participação relacionado com o modo de menor amortecimento, corresponde à máquina 2, e é mostrado na parte final do apêndice A, correspondente ao sistema 1.

Neste caso, utiliza-se a velocidade como sinal adicional, sendo que este sinal é freqüentemente utilizado em projetos de ESP's, devido à elevada observabilidade de todos os modos eletromecânicos oscilantes. Em projetos clássicos de controladores, às vezes é necessário usar filtros no estabilizador. Isto permite atenuar sinais na faixa da freqüência torsional. É aconselhável elevada precisão na medida da velocidade para conseguir pequenos desvios em relação a velocidade nominal. É importante destacar que muitos outros sinais podem ser usados para projetar o ESP (freqüência, potência elétrica, tensão terminal ou uma combinação destes sinais [1]).

A tabela 4.6 mostra os autovalores associados aos modos eletromecânicos em malha aberta do Sistema 1, os quais podem ser comparados com os modos eletromecânicos mostrados nas tabelas 4.3 a 4.5.

| Nome | Autovalor | Amortecimento $\xi(\%)$ |
|--------|--------------------------|----------------------------|
| modo 1 | $-0,6991 \pm j\,12,7334$ | 5,5 |
| modo 2 | $-0,0980 \pm j\,7,0173$ | 1,4 |

Tabela 4.6: Autovalores associados aos modos eletromecânicos em malha aberta para o Sistema 1

Através dos fatores de participação, que são apresentados na parte final dos dados correspondentes ao sistema 1, no Apêndice A, pode-se ver claramente que o modo de menor amortecimento (modo 2), está fortemente influenciado pelo gerador 2. Deverá ser então primeiramente projetado um ESP para esta máquina. O projeto dos ESP's foi realizado em forma sequencial, através do método de lugar das raízes. Considera-se a configuração do ESP como um caso particular da mostrada na figura 2.3, já que no caso de velocidade, comumente $T_3 = T_4$, e $T_1 = T_2$ [42]. Para este exemplo, as constantes de tempo T_3 e T_4 são especificadas em 0,05s, devendo ocorrer o avanço de fase máximo do compensador nas frequências do modo eletromecânico de interesse. A constante de tempo T_w do bloco "wash-out" é previamente especificada em 10s. Os tempos T_1 e T_2 foram considerados iguais no projeto e o ganho K_{STAB} foi calculado para estas condições. Desta maneira o ESP projetado tem a configuração mostrada na figura 4.15.

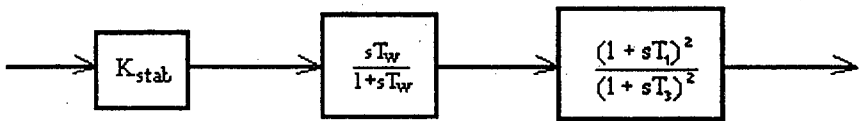


Fig. 4.15 Bloco compensador do tipo avanço-atraso

T_3 , tempo especificado em 0,05s.
 T_w , tempo especificado em 10s.
 K_{stab} , T_1 , são projetados

Com as considerações acima mencionadas, o método utilizado para projetar o ESP foi o do lugar das raízes [31,32], tendo-se especificado os autovalores como $\lambda = -0,5 \pm j7$. As tabelas 4.7, 4.8 e 4.9 mostram os resultados do projeto do ESP através dos sistemas equivalentes de ordem 9, 7 e 5, respectivamente.

| | HANKEL | MOORE | LEVY | PRONY |
|------------|--------|--------|--------|--------|
| K_{stab} | 2,2171 | 2,2382 | 1,9312 | 2,9939 |
| T_1 | 0,5363 | 0,5299 | 0,5727 | 0,4523 |

Tab. 4.7 Resultados do projeto do ESP para o sistema 1. Ordem de aproximação usada 9.
($T_3 = 0,05s$; $T_w = 10s$)

| | HANKEL | MOORE | LEVY | PRONY |
|------------|--------|--------|--------|--------|
| K_{stab} | 2,5945 | 2,2398 | 1,9312 | 3,5998 |
| T_1 | 0,5540 | 0,5298 | 0,5741 | 0,3948 |

Tab. 4.8 Resultados do projeto do ESP para o sistema 1. Ordem de aproximação usada 7.
($T_3 = 0,05s$; $T_w = 10s$)

| | HANKEL | MOORE | LEVY | PRONY |
|------------|--------|--------|--------|--------|
| K_{stab} | 1,7478 | 2,4831 | 2,7528 | 4,0231 |
| T_1 | 0,4641 | 0,4932 | 0,4668 | 0,3512 |

Tab. 4.9 Resultados do projeto do ESP para o sistema 1. Ordem de aproximação usada 5.
($T_3 = 0,05s$; $T_w = 10s$)

Para ter uma melhor apreciação dos resultados do projeto, as tabelas 4.10, 4.11 e 4.12 mostram os pólos em malha fechada do sistema 1, não reduzido, usando os controladores obtidos através dos sistemas equivalentes de quinta, sétima e nona ordem respectivamente. O ESP é aplicado no gerador 2.

| Modelo via Hankel aprox. de 5ª ordem | Amortecimento $\xi(\%)$ | Modelo via Moore aprox. de 5ª ordem | Amortecimento $\xi(\%)$ |
|---|----------------------------|--|----------------------------|
| -27,6976+j 0,0000 | | -29,2134+j 0,0000 | |
| -17,7126+j 0,0000 | | -17,7127+j 0,0000 | |
| -0,8371±j 12,7957 | 6,57 | -0,9327±j 12,8234 | 7,25 |
| -0,3400±j 7,0284 | 4,90 | -0,4877±j 7,0169 | 6,93 |
| -5,2893+j 0,0000 | | -5,2914+j 0,0000 | |
| -3,6417+j 0,0000 | | -3,6420+j 0,0000 | |
| -0,5020±j 0,6837 | 59,18 | -0,5011±j 0,6831 | 59,15 |
| -0,3444±j 0,3975 | 65,48 | -0,3443±j 0,3973 | 65,49 |
| -14,6085±j 6,2746 | 91,88 | -13,6070±j 7,3489 | 87,98 |
| -0,1001+j 0,0000 | | -0,1002+j 0,0000 | |

Tabela 4.10 (a) Pólos em malha fechada para o Sistema 1, adicionando o ESP projetado usando sistemas equivalentes de 5ª ordem via Hankel e Moore.

| Modelo via Levy aprox. de 5ª ordem | Amortecimento $\xi(\%)$ | Modelo via Prony aprox. de 5ª ordem | Amortecimento $\xi(\%)$ |
|---------------------------------------|----------------------------|--|----------------------------|
| -29,1610+j 0,0000 | | -26,6805+j 0,0000 | |
| -17,7127+j 0,0000 | | -17,7124+j 0,0000 | |
| -0,9300±j 12,8276 | 7,23 | -0,7857±j 12,9049 | 6,08 |
| -0,4880±j 7,0294 | 6,92 | -0,3520±j 7,3644 | 4,77 |
| -5,2911+j 0,0000 | | -5,2868+j 0,0000 | |
| -3,6419+j 0,0000 | | -3,6425+j 0,0000 | |
| -0,5009±j 0,6826 | 59,16 | -0,4970±j 0,6548 | 60,46 |
| -0,3443±j 0,3971 | 65,51 | -0,3455±j 0,3895 | 66,36 |
| -13,6361±j 7,2786 | 88,22 | -15,1906±j 4,6211 | 95,67 |
| -0,1002+j 0,0000 | | -0,1015+j 0,0000 | |

Tabela 4.10 (b) Pólos em malha fechada para o Sistema 1, adicionando o ESP projetado usando sistemas equivalentes 5ª ordem via Levy e Prony.

| Modelo via Hankel aprox. de 7ª ordem | Amortecimento $\xi(\%)$ | Modelo de Moore aprox. de 7ª ordem | Amortecimento $\xi(\%)$ |
|---|----------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| -30,2638+j 0,0000 | | -29,3866+j 0,0000 | |
| -17,7127+j 0,0000 | | -17,7127+j 0,0000 | |
| -1,0217±j 12,8322 | 7,94 | -0,9447±j 12,8203 | 7,35 |
| -0,6082±j 6,9784 | 8,68 | -0,4999±j 7,0005 | 7,12 |
| -5,2939+j 0,0000 | | -5,2921+j 0,0000 | |
| -3,6423+j 0,0000 | | -3,6421+j 0,0000 | |
| -0,5007±j 0,6834 | 59,10 | -0,5012±j 0,6836 | 59,13 |
| -0,3443±j 0,3973 | 65,49 | -0,3443±j 0,3974 | 65,48 |
| -12,8714±j 8,1484 | 84,49 | -13,4957±j 7,5107 | 87,38 |
| -0,1002+j 0,0000 | | -0,1002+j 0,0000 | |

Tabela 4.11 (a) Pólos em malha fechada para o Sistema 1, adicionando o ESP projetado usando sistemas equivalentes de 7ª ordem via Hankel e Moore.

| Modelo via Levy aprox de 7ª ordem | Amortecimento $\xi(\%)$ | Modelo via Prony aprox. de 7ª ordem | Amortecimento $\xi(\%)$ |
|--------------------------------------|----------------------------|--|----------------------------|
| -29,4504+j 0,0000 | | -28,8712+j 0,0000 | |
| -17,7127+j 0,0000 | | -17,7127+j 0,0000 | |
| -0,9479±j 12,8144 | 7,38 | -0,9142±j 12,8517 | 7,10 |
| -0,4983±j 6,9838 | 7,11 | -0,4869±j 7,1016 | 6,84 |
| -5,2926+j 0,0000 | | -5,2892+j 0,0000 | |
| -3,6422+j 0,0000 | | -3,6416+j 0,0000 | |
| -0,5015±j 0,6841 | 59,12 | -0,4999±j 0,6792 | 59,28 |
| -0,3444±j 0,3975 | 65,48 | -0,3444±j 0,3962 | 65,60 |
| -13,4616±j 7,6001 | 87,08 | -13,7999±j 6,8839 | 89,48 |
| -0,1002+j 0,0000 | | -0,1004+j 0,0000 | |

Tabela 4.11 (b) Pólos em malha fechada para o Sistema 1, adicionando o ESP projetado usando modelos equivalentes 7ª ordem via Levy e Prony.

| Modelo via Hankel aprox. de 9ª. ordem | Amortecimento $\xi(\%)$ | Modelo via Moore aprox. de 9ª ordem | Amortecimento $\xi(\%)$ |
|--|----------------------------|--|----------------------------|
| -29,4418+j 0,0000 | | -29,3855+j 0,0000 | |
| -17,7127+j 0,0000 | | -17,7127+j 0,0000 | |
| -0,9488±j 12,8202 | 7,38 | -0,9446±j 12,8202 | 7,35 |
| -0,5012±j 0,6836 | 59,13 | -0,4998±j 7,0004 | 7,12 |
| -5,2923+j 0,0000 | | -5,2921+j 0,0000 | |
| -3,6421+j 0,0000 | | -3,6421+j 0,0000 | |
| -0,5051±j 6,9974 | 7,20 | -0,5012±j 0,6836 | 59,13 |
| -0,3443±j 0,3974 | 65,48 | -0,3443±j 0,3974 | 65,48 |
| -13,4587±j 7,5561 | 87,20 | -13,4965±j 7,5101 | 87,38 |
| -0,1002+j 0,0000 | | -0,1002+j- 0,0000 | |

Tabela 4.12 (a) Pólos em malha fechada para o Sistema 1, adicionando o ESP projetado usando modelos equivalentes de 9ª ordem via Hankel e Moore.

| Modelo via Levy aprox. de 9ª ordem | Amortecimento $\xi(\%)$ | Modelo via Prony aprox. de 9ª ordem | Amortecimento $\xi(\%)$ |
|---------------------------------------|----------------------------|--|----------------------------|
| -29,4483+j 0,0000 | | -29,2148+j 0,0000 | |
| -17,7127+j 0,0000 | | -17,7127+j 0,0000 | |
| -0,9478±j 12,8145 | 7,38 | -0,9349±j 12,8322 | 7,27 |
| -0,4984±j 6,9843 | 7,12 | -0,4982±j 7,0370 | 7,06 |
| -5,2926+j 0,0000 | | -5,2910+j 0,0000 | |
| -3,6422+j 0,0000 | | -3,6419+j 0,0000 | |
| -0,5015±j 0,6841 | 59,12 | -0,5007±j 0,6822 | 59,17 |
| -0,3444±j 0,3975 | 65,48 | -0,3443±j 0,3970 | 65,52 |
| -13,4628±j 7,5972 | 87,09 | -13,5943±j 7,2940 | 88,12 |
| -0,1002+j 0,0000 | | -0,1003+j 0,0000 | |

Tabela 4.12 (b) Pólos em malha fechada para o Sistema 1, adicionando o ESP projetado usando modelos equivalentes 9ª ordem via Levy e Prony.

Nas tabelas 4.10(a-b), 4.11(a-b) e 4.12(a-b) observa-se os autovalores do sistema 1 em malha fechada, com a inclusão do ESP projetado, usando modelos equivalentes obtidos pelos quatro métodos analisados. Devido ao elevado amortecimento

conseguido para os modos eletromecânicos não se faz necessário o projeto de outros estabilizadores.

4.2.2 Sistema 2

No segundo exemplo utilizou-se uma configuração do sistema Sul-Sudeste brasileiro, que neste estudo será denominado Sistema 2, e constiuti-se de 77 barras e 13 geradores. Os geradores das barras 569, 714, 1017 são representados através do modelo 4 de máquina [50], o gerador da barra 1031 é representado pelo modelo 1 de máquina [50], e neste estudo é usado como referência. Os demais geradores são representados através do modelo 2 de máquina [50]. Todos os geradores tem reguladores automáticos de tensão (RAT's) modelo IEEE ST1, com a configuração mostrada na figura 4.1. A tabela 4.13 apresenta os dados correspondentes aos RAT's. Da mesma maneira que no exemplo anterior, os dados e as condições de operação são mostradas no Apêndice A. A ordem do sistema 2 é 66.

| K_a | T_a | K_F | T_F | V_{lmin} | V_{lmax} | V_{Rmin} | V_{Rmax} |
|--------|-------|-------|-------|------------|------------|------------|------------|
| 30.000 | 0.05 | 0.001 | 100.0 | -5.000 | 5.000 | -5.000 | 5.000 |

Tabela 4.13 Dados dos RAT's dos geradores do sistema 2

A tabela 4.14 mostra os modos electromecânicos do sistema 2. Estes modos foram obtidos através de simulação computacional, usando o programa de EIGEN [46]. Estes resultados permitem comparar os modos eletromecânicos obtidos através dos métodos de Prony e de Levy estudados neste trabalho. Na tabela 4.14 pode-se observar o baixo amortecimento que apresentam vários modos eletromecânicos, existindo incluso amortecimento negativo.

| # | modo | amortecimento $\xi(\%)$ |
|-------|------------------------|-------------------------|
| 1-2 | $-0,7348 \pm j11,7634$ | 6,2 |
| 3-4 | $-0,5708 \pm j10,7576$ | 5,3 |
| 5-6 | $-0,0658 \pm j9,8664$ | 0,67 |
| 7-8 | $-0,0595 \pm j8,1419$ | 0,73 |
| 9-10 | $-0,9156 \pm j8,1489$ | 11,2 |
| 11-12 | $-0,1446 \pm j7,7380$ | 1,87 |
| 13-14 | $-0,6231 \pm j7,9002$ | 7,86 |
| 15-16 | $-0,3647 \pm j7,0126$ | 5,2 |
| 17-18 | $-0,3209 \pm j6,8308$ | 4,7 |
| 19-20 | $-0,0488 \pm j6,1538$ | 0,79 |
| 21-22 | $-0,0959 \pm j5,3022$ | 1,81 |
| 23-24 | $0,2046 \pm j3,4609$ | -5,90 |

Tabela 4.14 Modos eletromecânicos em malha aberta para o Sistema 2, obtidos através de simulação computacional.

A seguir, objetiva-se obter os modelos equivalentes aplicando os métodos de Prony e de Levy analisados neste trabalho. Deve-se notar que para identificar a função de transferência do sistema 2 através do método de Prony, a entrada escolhida é um pulso de onda quadrada, de baixa amplitude, como mostrada na figura 4.16. De acordo com os fatores de participação associados aos modos de amortecimento negativo, o sinal de entrada é aplicado ao gerador 1017 (Apêndice A), e considerando como referência o gerador da barra 1031. A descrição desta entrada, usando a equação (3.22) resulta em $k=1$, $c_0 = 0.02$, $c_1 = -0.02$, $D_0 = 0$, $D_1 = 0.5$, e $\lambda_{n+1} = 0$.

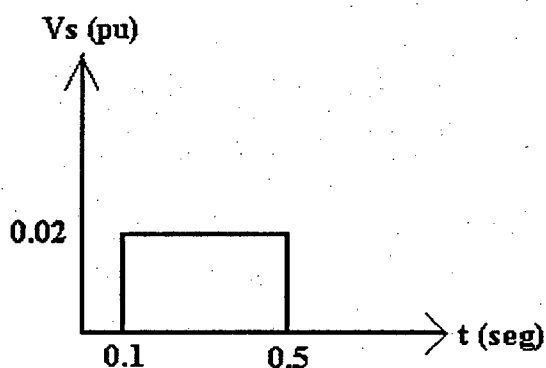


Fig. 4.16 Sinal de entrada aplicado no gerador 1017 do Sistema 2, para obter a função de transferência pelo método de Prony.

A seguir, apresenta-se a tabela 4.15, que mostra todos os autovalores em malha aberta identificados pelos métodos de Prony e Levy, respectivamente, havendo-se escolhido, após muitos testes, a ordem do modelo reduzido igual a 15. Vale destacar novamente, que pela experiência do autor deste trabalho, ao aplicar as equações (3.38) e (3.44) do método de Prony, foram conseguidos melhores resultados considerando 18 linhas e 15 colunas (ordem do modelo reduzido), nas mencionadas equações, o que significa que foram consideradas um total de 151 amostras, uniformemente espaçadas no tempo com $\Delta t = 0,1 \text{ seg.}$, a partir de 0,5 seg. (tempo no qual o pulso deixa de ser aplicado). Estas amostras foram obtidas através de 20 segundos de simulação computacional, usando o programa SIM [46].

| Modelo via Levy . ordem = 15 | Amortecimento $\xi(\%)$ | Modelo via Prony ordem = 15 | Amortecimento $\xi(\%)$ |
|---------------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| -22,2126 | | $0,4967 \pm j13,4743$ | -3,68 |
| $0,2095 \pm j13,2016$ | -1,58 | $-0,6282 \pm j10,1637$ | 6,17 |
| $-0,6225 \pm j9,2447$ | 6,72 | $-1,6907 \pm j7,8230$ | 21,12 |
| $-4,8787 \pm j3,9168$ | 77,98 | $-0,3654 \pm j6,8391$ | 5,33 |
| $-0,4165 \pm j6,8693$ | 6,1 | $-0,0488 \pm j5,3066$ | 0,92 |
| $-0,0797 \pm j6,1660$ | 1,29 | $0,2075 \pm j3,4369$ | -6,03 |
| $-0,0940 \pm j5,3065$ | 1,77 | -2,3348 | |
| $0,2045 \pm j3,4608$ | -5,90 | $-0,2137 \pm j0,1469$ | 82,41 |

Tabela 4.15 Autovalores em malha aberta, identificados através dos métodos de Levy e Prony.

Comparando-se a tabela 4.15 com a tabela 4.14, pode-se concluir que alguns dos modos eletromecânicos foram identificados pelos modelos equivalentes, destacando-se o método de Levy pela precisão do modelo aproximado obtido. Deve-se notar que em ambos sistemas aparecem alguns autovalores estranhos ($0,2095 \pm j13,2016$, e $0,4967 \pm j13,4743$, nos métodos de Levy e Prony, respectivamente), que só servem para ajustar o modelo aproximado.

Deve-se indicar que não é possível obter modelos equivalentes pelos métodos de Moore e da mínima norma de Hankel devido à pouca controlabilidade e pouca observabilidade que este sistema apresenta, além de possuir características instáveis.

4.2.2.1 Projeto de ESP's para o Sistema 2

Analisando-se a tabela 4.14, obtida através de simulação (Prog. EIGEN [46]), ou a tabela 4.15, que representa os autovalores do modelo equivalente, existem em ambas a presença de modos pouco amortecidos ou com amortecimento negativo. Pretende-se estabilizar o sistema instalando sinais adicionais nos geradores que estejam fortemente relacionados com estes modos pouco amortecidos. O projeto dos ESP's foi feito em forma

seqüencial [48], aplicando, em cada passo, a metodologia de lugar das raízes [31,32]. O algoritmo seqüencial de projeto dos ESP's consiste em determinar os parâmetros de cada estabilizador seqüencialmente, de modo que um dado par de modos eletromecânicos seja posicionado numa região do plano complexo s . Adicionando o estabilizador projetado, são obtidos novamente os modelos equivalentes para projetar o segundo estabilizador. Este processo é realizado até conseguir melhorar os amortecimentos de todos os modos eletromecânicos. A configuração considerada para cada ESP projetado para o sistema 2 é mostrada na figura 4.3. Vale salientar, que para a obtenção do modelo equivalente via Prony, a cada passo do projeto dos ESP's, foi sempre utilizado um sinal de entrada como mostrado na figura 4.4. O gerador, no qual deve-se aplicar o mencionado sinal é determinado a cada passo através dos fatores de participação associados com os modos de menor amortecimento.

Os resultados do projeto seqüencial dos ESP's para o sistema 2, usando os modelos equivalentes via Prony e via Levy mostram que devem ser instados sinais adicionais nos geradores das barras 1017, 183, 710, 94 e 712 (esquema no Apêndice A).

A tabela 4.16 mostra os resultados do projeto seqüencial dos estabilizadores usando modelos reduzidos através do método de Prony.

| Gerador | 1017 | 183 | 710 | 94 | 712 |
|------------|---------|--------|---------|---------|--------|
| K_{stab} | 24,1502 | 1,5404 | 10,8210 | 10,9173 | 3,7386 |
| T_1 | 0,2313 | 0,2450 | 0,1404 | 0,1506 | 0,1356 |

Tabela 4.16 Projeto dos ESP's para o Sistema 2, usando modelos equivalentes via Prony (ordem 15)

A tabela 4.17 mostra os modos eletromecânicos em malha fechada do sistema original, obtida através de simulação computacional (programa EIGEN [46]). A mencionada tabela é obtida adicionando os estabilizadores projetados nos respectivos geradores, usando modelos equivalentes através do método de Prony. Os resultados da

tabela 4.17 mostram que o sistema foi estabilizado. Neste caso não há presença de autovalores com baixo amortecimento, estando todos acima ou perto de 5%.

| # | modo | amortecimento ξ (%) |
|-------|------------------------|-------------------------|
| 1-2 | $-0,7348 \pm j11,7634$ | 6,2 |
| 3-4 | $-0,5708 \pm j10,7576$ | 5,3 |
| 5-6 | $-0,9207 \pm j10,2826$ | 8,9 |
| 7-8 | $-0,9190 \pm j8,7497$ | 10,4 |
| 9-10 | $-0,6290 \pm j8,1793$ | 7,7 |
| 11-12 | $-0,9456 \pm j8,1197$ | 11,6 |
| 13-14 | $-0,6443 \pm j7,857$ | 8,2 |
| 15-16 | $-0,3338 \pm j6,9122$ | 4,8 |
| 17-18 | $-0,4625 \pm j6,5872$ | 7,0 |
| 19-20 | $-0,3755 \pm j6,1942$ | 6,1 |
| 21-22 | $-1,7344 \pm j4,7792$ | 34,1 |
| 23-24 | $-0,7108 \pm j3,3263$ | 20,9 |

Tabela 4.17 Modos eletromecânicos em malha fechada para o Sistema 2. usando modelos equivalentes via Prony

A tabela 4.18 mostra os resultados do projeto sequencial dos estabilizadores usando modelos reduzidos através do método de Levy.

| Gerador | 1017 | 183 | 710 | 94 | 712 |
|------------|--------|---------|---------|---------|--------|
| K_{stab} | 19,092 | 25,0919 | 20,0919 | 21,6731 | 5,7193 |
| T_I | 0,2045 | 0,1060 | 0,1056 | 0,0992 | 0,1273 |

Tabela 4.18 Projeto dos ESP's para o Sistema 2, usando modelos equivalentes via Levy (ordem 15)

A tabela 4.19 mostra os modos eletromecânicos em malha fechada do sistema original, obtida através de simulação computacional (programa EIGEN [46]). A mencionada tabela é obtida adicionando os estabilizadores projetados nos respectivos geradores, usando modelos equivalentes através do método de Levy. Os resultados da tabela 4.17 mostram que o sistema foi estabilizado. Neste caso não há presença de autovalores com baixo amortecimento, estando todos acima ou perto de 5%.

| # | modo | amortecimento ξ (%) |
|-------|-------------------------|-------------------------|
| 1-2 | $-0,73434 \pm j11,7635$ | 6,2 |
| 3-4 | $-0,62420 \pm j11,6754$ | 5,3 |
| 5-6 | $-0,57084 \pm j10,7577$ | 5,3 |
| 7-8 | $-0,89106 \pm j9,3407$ | 9,5 |
| 9-10 | $-0,47137 \pm j8,6036$ | 5,5 |
| 11-12 | $-0,93635 \pm j8,1589$ | 11,4 |
| 13-14 | $-0,64701 \pm j7,8824$ | 8,2 |
| 15-16 | $-0,87166 \pm j7,1337$ | 12,1 |
| 17-18 | $-0,32810 \pm j6,8977$ | 4,9 |
| 19-20 | $-0,42466 \pm j6,4339$ | 6,6 |
| 21-22 | $-0,66705 \pm j6,1094$ | 10,9 |
| 23-24 | $-0,61084 \pm j3,5327$ | 17,0 |

Tabela 4.19 Modos eletromecânicos em malha fechada para o Sistema 2 usando modelos equivalentes via Levy

4.3 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os resultados correspondentes ao projeto de ESP's usando modelos equivalentes para dois sistemas conhecidos na literatura. A metodologia empregada de projeto foi em forma sequencial, através do lugar das raízes.

A validação dos resultados do projeto, foi feita através de simulação computacional, adicionando os ESP's projetados nos sistemas linearizados não-reduzidos. Com relação ao sistema 1, em todos os casos estudados, os pólos foram posicionados nas posições desejadas. No sistema 2, trabalhando com os ESP's projetados através dos modelos equivalentes obtidos pelos métodos de Prony e Levy, o posicionamento dos pólos foi conseguido nas posições desejadas. No entanto, deve-se indicar que não foi possível obter modelos equivalentes pelos métodos de Hankel e Moore, devido ao fato deste sistema ser originalmente instável, além de ser pouco controlável e pouco observável. Isto torna as matrizes gramianas de controlabilidade e observabilidade não positiva definidas, impossibilitando, desta forma, a obtenção da transformação singular para uma realização balanceada.

Capítulo 5

Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as conclusões finais deste trabalho, destacando-se a aplicação dos modelos equivalentes apresentados no capítulo 4 no projeto de ESP's.

A identificação e/ou redução de modelos de potência, que aproximem o comportamento dinâmico dos sistemas originais, especialmente em sistemas de grande porte, constitui uma ferramenta poderosa de ajuda no projeto de controladores, diminuindo assim o esforço e o tempo computacional.

Classificam-se os métodos de Prony e de Levy como métodos de identificação e redução de funções de transferência, que utilizam amostras em função do tempo e da frequência, respectivamente. No entanto, os métodos de Moore e da mínima norma de Hankel permitem somente a redução de ordem para sistemas lineares estáveis, invariantes no tempo, completamente controláveis ou completamente observáveis, com múltiplas entradas e múltiplas saídas.

A seguir, apresentam-se algumas observações e conclusões em relação a cada método estudado :

- Método de Levy

O método de Levy é um recurso frequentemente utilizado em empresas do setor elétrico. Pode ser aplicado a sistemas que possuem funções de transferência de ordem elevada. No entanto, este método, para o caso de ser aplicado por levantamento do campo, apresenta como desvantagem a grande sensibilidade a erros de medidas e a inexistência de rejeição de medidas espúrias [44], especialmente pelos equipamentos disponíveis, tais como: analisadores digitais de sinais, geradores de funções, osciloscópios, etc.

- Método de Prony

Com relação ao método de Prony, pode-se indicar que é resultado de recente pesquisa na aplicação a identificação de funções de transferência. Na aplicação a sistemas de potência, a ordem da função de transferência é tão grande como o número de estados que são necessários para modelar o sistema. O sinal de entrada aplicado ao sistema de potência geralmente excita muitos modos, sendo que os principais dentre eles deverão estar presentes na função de transferência identificada. Entretanto, muitos destes pólos ou autovalores podem não ser observados pelo uso de um sinal aplicado ao sistema. Esta situação às vezes não permite identificar eficientemente a função de transferência do sistema. Vale entretanto salientar que esta excitação não necessita ser persistente, como exigem outros métodos associados a técnicas de mínimos quadrados no processo de identificação. Finalmente, a característica não-linear do sistema, e sua natural variação no tempo, às vezes complicam o processo para obter modelos adequados para o projeto de algum controlador.

Pode-se concluir, portanto, que os métodos de Prony e de Levy, possuem seus problemas específicos, apresentando vantagens e desvantagens, tornando difícil

definir de modo geral qual método deve ser utilizado, dado um problema de identificação/redução de ordem.

- Método de Moore e da Mínima Norma de Hankel

Com relação aos métodos de redução de Moore e da mínima norma de Hankel, eles se constituem em técnicas novas para a construção de equivalentes dinâmicos para sistemas de potência. O método de Moore, encontra fundamentalmente uma base especial, onde a representação do sistema nesta base recebe o nome de realização balanceada, para este processo é possível trocar a controlabilidade pela observabilidade. Fundamentalmente este método consiste em obter as matrizes gramianas de controlabilidade e observabilidade iguais e diagonais. Este processo destaca-se por permitir a determinação dos estados "menos controláveis" e "menos observáveis". O método da mínima norma de Hankel tem como base a representação balanceada proposta pelo método de Moore, mas esta técnica garante que o equivalente dinâmico reduzido apresenta o mínimo erro em baixas e elevadas frequências.

Na aplicação de redução de ordem de sistemas de potência destas últimas técnicas - Método de Moore e método da mínima norma de Hankel -, é necessário que o sistema original seja assintoticamente estável, além de ser completamente controlável ou completamente observável, garantindo com isto que a matriz gramiana de controlabilidade e de observabilidade sejam positivas definidas, respectivamente. Estas restrições limitam o uso destas últimas técnicas a sistemas de potência particulares.

Os métodos de redução de ordem desenvolvidos neste trabalho foram utilizados para identificação e obtenção de modelos equivalentes, com objetivo de aplicá-los no projeto de estabilizadores de sistemas de potência. A seguir são apresentadas as conclusões obtidas da aplicação destes métodos:

- Foram realizados testes em dois sistemas de potência, designados como sistema 1 e sistema 2, descritos no capítulo anterior. O projeto dos ESP's foi

realizado em forma seqüencial, usando o método de lugar das raízes. Para deslocar os modos eletromecânicos de interesse, selecionou-se adequadamente a posição dos autovalores a serem especificados. A escolha da localização dos ESP's foi feita considerando-se os fatores de participação.

- Pode-se concluir que, para o sistema 1, os resultados são altamente satisfatórios ao se utilizar os modelos equivalentes obtidos pelos quatro métodos estudados. Vale salientar que os métodos de redução de ordem de Moore e da mínima norma de Hankel utilizam como entrada a matriz de estados. O uso desta matriz na prática é algo difícil, devido às dimensões da mesma. Tem-se ainda o problema de que o procedimento matemático para aplicar estes métodos torna bastante difícil a utilização de técnicas de esparsidade.

- Com relação ao sistema 2, foram utilizados os modelos equivalentes obtidos pelos métodos de Prony e de Levy para o projeto dos ESP's. Devido ao fato de que este sistema apresenta características de pouca controlabilidade e pouca observabilidade, as técnicas de redução de ordem de Moore e da mínima norma de Hankel não puderam ser aplicadas.

Considerando a ampla aplicação que podem ter os modelos equivalentes, pode-se pensar nos seguintes temas de investigação para melhorar os algoritmos propostos:

- Identificação e redução de ordem de modelos lineares para sistemas com condições iniciais arbitrárias, através do método de Prony.
- Melhorar o uso do método de Prony adicionando filtros que ajustam melhor a solução.

- Pesquisar algoritmos que permitam ampliar o uso dos métodos de Moore e da mínima norma de Hankel para sistemas instáveis.
- O uso dos métodos de Moore e da mínima norma de Hankel não com o objetivo de minimizar, mas sim com a finalidade de identificar "componentes que pouco influenciam" em um sistema.
- Aplicação das técnicas de redução a sistemas descritores.
- Uso dos modelos equivalentes juntamente com outras técnicas de projeto.
- Projeto de outros controladores de sistemas de potência, como sinais suplementares de compensadores estáticos de reativo e de capacitores série controlados, usando os modelos equivalentes.

Referências Bibliográficas

- [1] - G. J. Rogers, P. Kundur, "Small Signal Stability of Power Systems", Panel Session on Eigenvalue and Frequency Domain Methods for System Dynamic Performance, IEEE Summer Power Meeting, Long Beach, California, July 9-14, 1989.
- [2] - D. C. Lee and P. Kundur, "Advanced Excitation System Controls for Power System Stability Enhancement", Cigre, paper 38-01, August 1986.
- [3] - J. F. Hauer, C. J. Demeure, L. L. Scharf, "Initial Results in Prony Analysis of Power System Response Signals", Paper No. 89SM702-2-PWRS, IEEE Summer Power Meeting, Long Beach, California, July 9-14, 1989.
- [4] - J. F. Hauer, "The Use of Prony Analysis to Determine Modal Content and Equivalent Models for Measured Power System Response", Panel Session on Eigenvalue and Frequency Domain Methods for System Dynamic Performance, IEEE Summer Power Meeting, Long Beach, California, July 9-14, 1989.
- [5] - F. B. Hildebrand, "Introduction to Numerical Analysis", New York: McGraw-Hill, 1956. (Capítulo 9).
- [6] - D. J. Trudnowski, J. R. Smith, T. A. Short, and D. A. Pierre, "An Application of Prony Methods in PSS Design for Multimachine Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 1, February 1991.
- [7] - J. R. Smith, J. F. Hauer, D. J. Trudnowski, "Transfer Function Identification in Power System Applications", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 3, August 1993.
- [8] - I. Kamwa, R. Grondin, J. Dickinson, S. Fortin, "A Minimal Realization Approach to Reduced-Order Modelling and Modal Analysis For Power System Response Signals", Paper No. 92 SM 490-3 PWRS, IEEE/PES 1992 Summer Meeting, Seattle, WA, July 12-16, 1992.

- [9] - J. F. Hauer, H. J. Boenig, "Control Aspects of the Tacoma Superconducting Magnetic Energy Storage Project", IEEE Trans. Pas., Vol. PWRS-2, No.2, May 1987.
- [10] - D. Y. Wong, G. J. Rogers, B. Porretta, P. Kundur, "Eigenvalue analysis of Very Large Power Systems", IEEE, Trans. Pas., Vol.3, No.2, May 1988.
- [11] - Anderson P. M., Fouad A. A., "Power System Control and Stability", Book, Iowa state university press, 1977.
- [12] - A. Manzoni, "Software gráfico para esquemas elétricos", Labspot - UFSC, versão 1, 1992.
- [13] - Yu. Y-N., "Electric Power System Dynamics", Book, Academic Press Inc. (London) Ltd., 1983.
- [14] - Kimbark, E. W., "Power System Stability", Wiley, New York, 1948.
- [15] - Venikov, V. A., "Transient Phenomena in Electric Power Systems", Trans. by B. Adkins and D. Rutenberg. Pergamon Press, New York, 1964.
- [16] - J. J. Paserba, J. F. Hauer, S. Nilsson, G. Sweezy, "Comparison of Prony and Eigenanalysis", GE Industrial and Power Systems/ Power Systems Engineering Department/ Schenectady, New York, December 4, 1991.
- [17] - D. A. Pierre, D. J. Trudnowski, and J. F. Hauer, "Identifying Linear Reduced-Order Models for Systems with Arbitrary Initial Conditions Using Prony Signal Analysis", IEEE Trans. Automat. Contr., vol 37, No. 6, June 1992, pp. 831-834.
- [18] - Ramdas Kumaresan, Donald W. Tufts, and Louis L. Scharf, "A Prony Method for Noise Data: Choosing the Signal Components and Selecting the Order in Exponential Signal Models", Proceedings of the IEEE, Vol. 72, No. 2, February 1964.
- [19] - Alan J. Laub, Michael T. Heath, Chris C. Paige, and Robert C. Ward, "Computation of System Balancing Transformations and Other

- Applications of Simultaneous Diagonalization Algorithms", IEEE Trans Automat. Contr., Vol. AC-32, No. 2, February, 1987.
- [20] - Sun-Yuan Kung, David W. Lin, "Optimal Hankel-Norm Model Reductions: Multivariable Systems", IEEE Trans Automat. Contr., Vol. AC-26, No. 4, August 1981.
- [21] - L. A. Mironovskii, "Hankel Operator and Hankel Functions of Linear Systems", Institute of Aircraft Instrument Construction, St. Petersburg. Translated from Avtomatika i Telemekhanika, No. 9, pp73-86, September, 1992.
- [22] - Lars Pernebo, Leonard M. Silverman, "Model Reduction via Balanced State Space Representations", IEEE Trans Automat. Contr., Vol. AC-27, No. 2, April 1982.
- [23] - Bruce C. Moore, "Principal Component Analysis in Linear Systems: Controllability, Observability, and Model Reduction", IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-26, No. 1, February 1981.
- [24] - K. Glover, "All Optimal Hankel-norm approximations of Linear Multivariable Systems and Their L_∞ error bounds", Int. J. Control, 39 (1984), p. 1115-1193.
- [25] - Maamar Bettayeb and Ubaid M. Al-Saggaf, "Practical Model Reduction Techniques for Power Systems", Electric Power Systems Research, 25, pp. 169-176, May 1992.
- [26] - Ubaid M. Al-Saggaf, "Reduced-Order Models for Dynamic Control of a Power Plant with an Improved Transient and Steady-State Behavior", Electric Power Systems Research, 26, pp. 79-85, July 1993.
- [27] - G. H. Golub, S. Nash, and C. Van Loan, "A Hessenberg-Schur Method for the Problem: $AX+XB=C$ ", IEEE Trans Automat. Contr., Vol. AC-24, No. 6, December 1979.

- [28] - Donald W. Tufts, Ramdas Kumaresan, and Ivars Kirsteins, "Data Adaptive Signal Estimation by Singular Value Decomposition of a Data Matrix", Proceedings of the IEEE, Vol. 70, No. 6, June 1982.
- [29] - E. C. Levy, "Complex Curve Fitting", IRE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-4, pp. 37-44; May, 1959.
- [30] - C. K. Sanathanan and J. Koerner, "Transfer Function Synthesis as a Ratio of Two Complex Polynomials", IEEE Trans. on Automat. Contr., January 1963.
- [31] - K. Bollinger, A. Laha, R. Hamilton, T. Harras, "Power Stabilizer Design Using Root Locus Methods", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-94, No. 5, September/October 1975.
- [32] - D'Azzo - Houpis, "Análise e Projeto de Sistemas de Controle Lineares", Editora Guanabara Dois S.A., 1984, versão original Copyright 1981, 1975 by McGraw-Hill, Inc.
- [33] - J. J. Dongarra, C. B. Moler, J. R. Bunch, G. W. Stewart, "Linpack User's Guide", Copyright 1979 by the Society for Industrial and Applied Mathematics, Siam, Philadelphia/1979.
- [34] - User's Guide, "Systems Identification Toolbox", Copyright 1986, by the MathWorks, Inc.
- [35] - Thomas Kailath, "Linear Systems", Prentice Hall, Inc. 1980
- [36] - Reference Manual, "Lahey Fortran Language System", (Revision B, November 1990). Copyright 1990 by Lahey Computer Systems, Inc.
- [37] - Reference Manual, "Lahey/Phar Lap: Dos Extender and Tools Reference", (Revision A, January 1992). Copyright 1992 by Lahey Computer Systems, Inc.
- [38] - IEEE Task Force on Terms and Definitions, "Proposed terms and definitions for power system stability", IEEE Trans PAS-101, pp 1894-1898, 1982

- [39] - Christopher Michel John Veal, "The Damping of Power System Oscillations by Generator Control", Thesis of doctor of Philosophy, Imperial College of Science Technology and Medicine, London 1989
- [40] - F. P. Demello and C. Concordia, "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control", IEEE Trans PAS, Vol. PAS-88, NO.4, April 1969.
- [41] - V. R. Ustariz Aramayo, "Ajuste de Sinais Adicionais em Sistemas de Potência", M.SC. Tese, UFSC, 1992.
- [42] - N. Martins, "Efficient Eigenvalue and Frequency Response Methods Applied to Power System Small-Signal Stability Studies", IEEE Trans PAS, Vol. PWRS-1, No.1, February 1986.
- [43] - A. J. A. Simões Costa, A. S. Silva, F. D. Freitas, "Coordinated Setting of Stabilizers for Synchronous Generators and Static VAR Compensators in Multimachine Systems", IV SEPOPE, Foz do Iguaçu, Maio 1994.
- [44] - S. Lamy, "Métodos para Identificação de Parâmetros de Funções de Transferência, com Capacidade de Rejeição de Medidas Espúrias", M.SC. Tese, UFSC, 1988.
- [45] - P. Goldenberg, "Redução de Ordem em Sistemas Lineares", Tese de doutorado, IME-USP, 1985.
- [46] - Silva S. A., "Placement and Control of Static Compensators for Power System Stability", Ph.D. Thesis, UMIST, UK, 1990.
- [47] - Reference Manual, "Lahey Make: By Opus Software Reference", (Revision A, January 1992). Copyright 1992 by Lahey Computer Systems, Inc. and Opus Software, Inc.
- [48] - Fleming R. J., Mohan M. A., Parvatisam K. "Selection of Parameters of Stabilizer in Multimachine Power Systems", IEEE Trans. PAS., may 1981.

- [49] - Seraji H., "**Pole Assignment using Dynamics Compensators with Preespified Pole**", Int. J. Control, Vol. 22, No. 2, 1975.
- [50] - Arrillaga J., Arnold C.P., "**Computer Modelling of Electrical Power Systems**", 1983.

APÊNDICE A

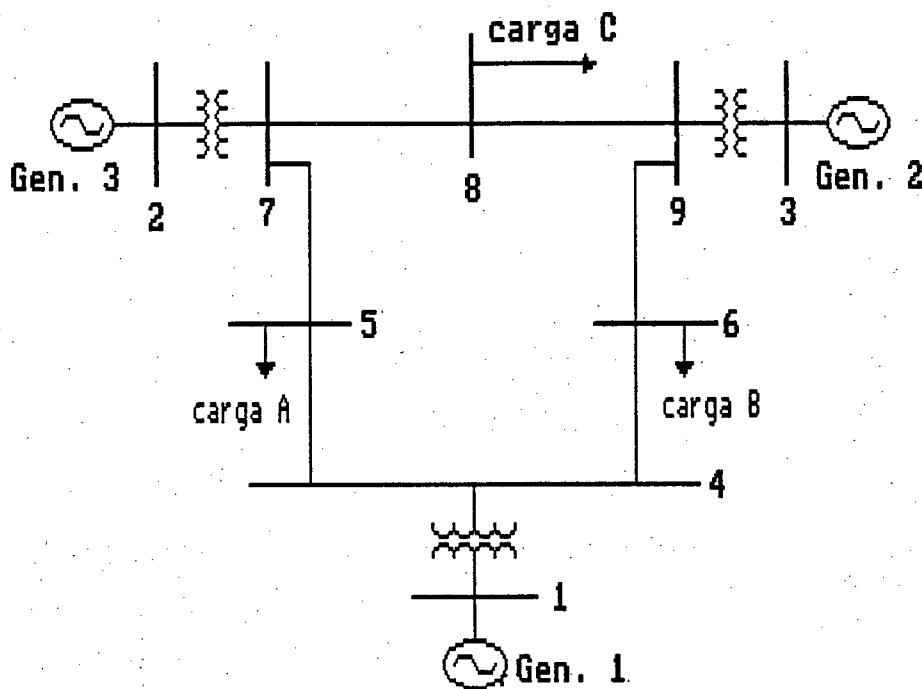


Figura A1: Esquema unifilar, Sistema I (Anderson)

***** DADOS DE ENTRADA SISTEMA ANDERSON *****

***** DADOS DOS CONTROLADORES E AS MÁQUINAS SINCRONAS*****

DADOS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 3

MODELO DE MAQUINA 3 (ROTOR CIRCULAR)

PARÂMETROS $X_d = 1.312$ $X_d' = 0.181$ $X_q = 1.258$ $X_q' = 0.250$
 $R_s = 0.00000$ $T_{do}' = 5.89000$ $T_{qo}' = 0.60000$ $H = 3.01000$ $D = 0.00000$

DADOS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO (RAT)

MODELO RAT 1 (IEEE model ST1)

PARÂMETROS $K_a = 25.000$ $T_a = 0.200$ $K_f = 0.100$ $T_f = 1.000$

LIMITES

$V_{lmin} = -5.000$ $V_{lmax} = 5.000$

$V_{rmin} = -5.000$ $V_{rmax} = 5.000$

DADOS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NUMERO 2

MODELO DE MÁQUINA 3 (ROTOR CIRCULAR)

PARAMETROS $X_d = 0.896$ $X_d' = 0.120$ $X_q = 0.865$ $X_q' = 0.197$
 $R_s = 0.00000$ $T_{do}' = 6.00000$ $T_{qo}' = 0.53500$ $H = 6.40000$ $D = 0.00000$

DADOS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO (RAT)

MODEL RAT 1 (IEEE model ST1)
PARAMETROS Ka= 25.000 Ta= 0.200 Kf= 0.100 Tf= 1.000

LIMITES

Vlmin= -5.000 Vlmax= 5.000

Vrmin= -5.000 Vrmax= 5.000

DADOS MÁQUINA SINCRONA

BUS NUMBER 1

MACHINE MODEL 1 (CLASSICAL MODEL)

PARAMETERS Xd'= 0.09690 H=10000.00000 D= 0.00000

***NESTE ESTUDO O GERADOR DA BARRA 1 É USADO COMO REFERÊNCIA ***

***** DADOS DE CARGA *****

| | COEFICIENTES DE POTÊNCIA CONSTANTE | | COEFICIENTES DE CURRENT CONSTANTE | | COEFICIENTES DE IMPEDÂNCIA CTE. | |
|----------------|---------------------------------------|------------|--------------------------------------|------------|------------------------------------|------------|
| | A-ACTIVA | D-REACTIVA | B-ACTIVA | E-REACTIVA | C-ACTIVA | F-REACTIVA |
| BARRA NUMERO 8 | | | | | | |
| PARAMETROS | A= 0.00000 | | B= 0.00000 | | C= 100.00000 | |
| | D= 0.00000 | | E= 0.00000 | | F= 100.00000 | |
| BARRA NUMERO 6 | | | | | | |
| PARAMETROS | A= 0.00000 | | B= 0.00000 | | C= 100.00000 | |
| | D= 0.00000 | | E= 0.00000 | | F= 100.00000 | |
| BARRA NUMERO 5 | | | | | | |
| PARAMETROS | A= 0.00000 | | B= 0.00000 | | C= 100.00000 | |
| | D= 0.00000 | | E= 0.00000 | | F= 100.00000 | |

***** CONDIÇÕES INICIAIS *****

*** CONDIÇÕES INICIAIS MÁQUINA SINCRONA E CONTROLADORES ***

CONDIÇÕES INICIAIS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NUMERO 3

MODELO DE MÁQUINA 3

Delta= 0.945 Ed'=-0.624 Eq'= 0.768 Ef= 1.403 Id=-0.561 Iq= 0.619 Pe= 0.850

CONDIÇÕES INICIAIS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

Vref= 1.081 Ef= 1.403

Vfl= 0.140

CONDIÇÕES INICIAIS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NUMBER 2

MODELO DE MÁQUINA 3

Delta= 1.066 Ed'=-0.622 Eq'= 0.788 Ef= 1.789 Id=-1.290 Iq= 0.932 Pe= 1.630

CONDIÇÕES INICIAIS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

Vref= 1.097 Ef= 1.789

Vfl= 0.179

CONDIÇÕES INICIAIS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NUMEERO 1

MODELO DE MÁQUINA 1

Delta= 0.063 Eq'= 1.067 Id=-0.303 Iq= 0.671 Pe= 0.716

CONDIÇÕES INICIAIS DE CARGA

BARRA NUMERO 8

A= 0.000 B= 0.000 C= 0.969

D= 0.000 E= 0.000 F= 0.339

BARRA NUMERO 6

A= 0.000 B= 0.000 C= 0.878

D= 0.000 E= 0.000 F= 0.293

BARRA NUMERO 5

A= 0.000 B= 0.000 C= 1.261

D= 0.000 E= 0.000 F= 0.504

AUTOVALORES

-17.84441 0.00000j (1)

-17.54203 0.00000j (2)

-0.69911 12.73340j (3)

-0.69911 -12.73340j (4)

-0.09795 7.01733j (5)

-0.09795 -7.01733j (6)

-5.28627 0.00000j (7)

-3.64147 0.00000j (8)

-0.50395 0.68568j (9)

-0.50395 -0.68568j (10)

-0.34460 0.39819j (11)

-0.34460 -0.39819j (12)

FATOR DE PARTICIPAÇÃO DA MATRIZ:

AUTOVALOR : Parte RE: -0.09795

Parte IM: 7.01733

VARIÁVEIS

Ed'3 0.004720

Eq'3 0.004221

delta3 0.097786

w3 0.097786

Ef3 0.000363

Vf1,3 0.000091

Ed'2 0.006226

Eq'2 0.018208

delta2 0.396804

w2 0.396804

Ef2 0.000972

Vf1,2 0.000243



***** DADOS DE ENTRADA SISTEMA SUL SUDESTE BRASILEIRO *****

***** DADOS DAS MÁQUINAS SINCRONAS Y DOS CONTROLADORES *****

DADOS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 176

MODELO DE MÁQUINA 2 (POLOS SALIENTES)

PARÂMETROS $X_d = 0.47280$ $X_d' = 0.06370$ $X_q = 0.47280$
 $R_s = 0.00000$ $T_{d0}' = 6.34000$ $H = 10.58000$ $D = 0.00000$

DADOS REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

RAT MODELO 1 (IEEE modelo ST1)

PARÂMETROS $K_a = 30.000$ $T_a = 0.050$ $K_f = 0.001$ $T_f = 100.000$

LIMITES

$V_{lmin} = -5.000$ $V_{lmax} = 5.000$

$V_{rmin} = -5.000$ $V_{rmax} = 5.000$

DADOS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 174

MODELO DE MÁQUINA 2 (POLOS SALIENTES)

PARÂMETROS $X_d = 1.15000$ $X_d' = 0.12120$ $X_q = 1.15000$
 $R_s = 0.00000$ $T_{d0}' = 5.00000$ $H = 4.98000$ $D = 0.00000$

DADOS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

RAT MODELO 1 (IEEE modelo ST1)

PARÂMETROS $K_a = 30.000$ $T_a = 0.050$ $K_f = 0.001$ $T_f = 100.000$

LIMITES

$V_{lmin} = -5.000$ $V_{lmax} = 5.000$

$V_{rmin} = -5.000$ $V_{rmax} = 5.000$

DADOS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 101

MODELO DE MÁQUINA 2 (POLOS SALIENTES)

PARÂMETROS $X_d = 0.43700$ $X_d' = 0.07800$ $X_q = 0.43700$
 $R_s = 0.00000$ $T_{d0}' = 3.90000$ $H = 11.30000$ $D = 0.00000$

DADOS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

RAT MODELO 1 (IEEE modelo ST1)

PARÂMETROS $K_a = 30.000$ $T_a = 0.050$ $K_f = 0.001$ $T_f = 100.000$

LIMITES

$V_{lmin} = -5.000$ $V_{lmax} = 5.000$

$V_{rmin} = -5.000$ $V_{rmax} = 5.000$

DADOS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 94

MODELO DE MÁQUINA 2 (POLOS SALIENTES)

PARÂMETROS $X_d = 0.21060$ $X_d' = 0.05500$ $X_q = 0.14570$
 $R_s = 0.00000$ $T_{d0}' = 9.55000$ $H = 20.34400$ $D = 0.00000$

DADOS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

RAT MODELO 1 (IEEE modelo ST1)

PARÂMETROS $K_a = 30.000$ $T_a = 0.050$ $K_f = 0.001$ $T_f = 100.000$

LIMITES

$V_{lmin} = -5.000$ $V_{lmax} = 5.000$

$V_{rmin} = -5.000$ $V_{rmax} = 5.000$

DADOS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 705

MODELO DE MÁQUINA 2 (POLOS SALIENTES)

PARÂMETROS $X_d = 1.20000$ $X_d' = 0.15330$ $X_q = 1.20000$
 $R_s = 0.00000$ $T_{d0}' = 5.00000$ $H = 5.06000$ $D = 0.00000$

DADOS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

RAT MODELO 1 (IEEE modelo ST1)

PARÂMETROS $K_a = 30.000$ $T_a = 0.050$ $K_f = 0.001$ $T_f = 100.000$

LIMITES

$V_{lmin} = -5.000$ $V_{lmax} = 5.000$

$V_{rmin} = -5.000$ $V_{rmax} = 5.000$

DADOS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 706

MODELO DE MÁQUINA 2 (POLOS SALIENTES)

PARÂMETROS $X_d = 0.74200$ $X_d' = 0.10060$ $X_q = 0.74200$
 $R_s = 0.00000$ $T_{d0}' = 4.89000$ $H = 9.68000$ $D = 0.00000$

DADOS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

RAT MODELO 1 (IEEE modelo ST1)

PARÂMETROS $K_a = 30.000$ $T_a = 0.050$ $K_f = 0.001$ $T_f = 100.000$

LIMITES

 $V_{\min} = -5.000$ $V_{\max} = 5.000$ $V_{r\min} = -5.000$ $V_{r\max} = 5.000$

DADOS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 183

MODELO DE MÁQUINA 2 (POLOS SALIENTES)

PARÂMETROS $X_d = 0.71220$ $X_d' = 0.20700$ $X_q = 0.53100$ $R_s = 0.00000$ $T_{d0}' = 7.32000$ $H = 4.51600$ $D = 0.00000$

DADOS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

RAT MODELO 1 (IEEE modelo ST1)

PARÂMETROS $K_a = 30.000$ $T_a = 0.050$ $K_f = 0.001$ $T_f = 100.000$

LIMITES

 $V_{\min} = -5.000$ $V_{\max} = 5.000$ $V_{r\min} = -5.000$ $V_{r\max} = 5.000$

DADOS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 710

MODELO DE MÁQUINA 2 (POLOS SALIENTES)

PARÂMETROS $X_d = 0.33840$ $X_d' = 0.09840$ $X_q = 0.23920$ $R_s = 0.00000$ $T_{d0}' = 4.91000$ $H = 11.30800$ $D = 0.00000$

DADOS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

RAT MODELO 1 (IEEE modelo ST1)

PARÂMETROS $K_a = 30.000$ $T_a = 0.050$ $K_f = 0.001$ $T_f = 100.000$

LIMITES

 $V_{\min} = -5.000$ $V_{\max} = 5.000$ $V_{r\min} = -5.000$ $V_{r\max} = 5.000$

DADOS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 569

MODELO DE MÁQUINA 4 (Q-AXIS SUBTRANSIENT)

PARÂMETROS $X_d = 0.05480$ $X_d' = 0.01800$ $X_d'' = 0.01440$ $X_q = 0.04100$ $X_q'' = 0.01440$ $R_s = 0.00000$ $T_{d0}' = 7.92000$ $T_{d0}'' = 0.06000$ $T_{q0}'' = 0.09000$ $H = 74.40000$ $D = 0.00000$

DADOS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

RAT MODELO 1 (IEEE modelo ST1)

PARÂMETROS $K_a = 30.000$ $T_a = 0.050$ $K_f = 0.001$ $T_f = 100.000$

LIMITES

 $V_{\min} = -5.000$ $V_{\max} = 5.000$ $V_{r\min} = -5.000$ $V_{r\max} = 5.000$

DADOS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 714

MODELO DE MÁQUINA 4 (Q-AXIS SUBTRANSIENT)

PARÂMETROS $X_d = 0.06200$ $X_d' = 0.02140$ $X_d'' = 0.01570$ $X_q = 0.04210$ $X_q'' = 0.01570$ $R_s = 0.00000$ $T_{d0}' = 10.00000$ $T_{d0}'' = 0.04000$ $T_{q0}'' = 0.13000$ $H = 57.28400$ $D = 0.00000$

DADOS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

RAT MODELO 1 (IEEE modelo ST1)

PARÂMETROS $K_a = 30.000$ $T_a = 0.050$ $K_f = 0.001$ $T_f = 100.000$

LIMITES

 $V_{\min} = -5.000$ $V_{\max} = 5.000$ $V_{r\min} = -5.000$ $V_{r\max} = 5.000$

DADOS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 712

MODELO DE MÁQUINA 2 (POLOS SALIENTES)

PARÂMETROS $X_d = 0.09510$ $X_d' = 0.03170$ $X_q = 0.06220$ $R_s = 0.00000$ $T_{d0}' = 8.98000$ $H = 39.25200$ $D = 0.00000$

DADOS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

RAT MODELO 1 (IEEE modelo ST1)

PARÂMETROS $K_a = 30.000$ $T_a = 0.050$ $K_f = 0.001$ $T_f = 100.000$

LIMITES

 $V_{\min} = -5.000$ $V_{\max} = 5.000$ $V_{r\min} = -5.000$ $V_{r\max} = 5.000$

DADOS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 1031
MODELO DE MÁQUINA 1 (MODELO CLÁSICO)
PARÂMETROS $X_d' = 0.00100$ $H = 1000.00000$ $D = 0.00000$

DADOS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 1017
MODELO DE MÁQUINA 4 (Q-AXIS SUBTRANSIENT)
PARÂMETROS $X_d = 0.01740$ $X_d' = 0.00581$ $X_d'' = 0.00466$
 $X_q = 0.01320$ $X_q' = 0.00466$ $R_s = 0.00000$
 $T_{do}' = 7.60000$ $T_{do}'' = 0.09000$ $T_{qo}'' = 0.19000$
 $H = 261.59000$ $D = 0.00000$

DADOS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

RAT MODELO 1 (IEEE modelo ST1)
PARÂMETROS $K_a = 30.000$ $T_a = 0.050$ $K_f = 0.001$ $T_f = 100.000$
LIMITES
 $V_{lmin} = -5.000$ $V_{lmax} = 5.000$
 $V_{rmin} = -5.000$ $V_{rmax} = 5.000$

*** NESTE ESTUDO O GERADOR NA BARRA 1031 É USADO COMO REFERÊNCIA***

*****DADOS DE CARGA *****

| | COEFICIENTES DE POTÊNCIA CONST. | | COEFICIENTES DE CORRENTE CONST. | | COEFICIENTES DE IMPEDÂNCIA CONST. | |
|-------------------|------------------------------------|---------|------------------------------------|---------|--------------------------------------|-----------|
| | A-ACTIVA D-REACTIVA | | B-ACTIVA E-REACTIVA | | C-ACTIVA F-REACTIVA | |
| BARRA NÚMERO 1167 | | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= | 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= | 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 1036 | | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= | 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= | 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 1031 | | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= | 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= | 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 826 | | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= | 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= | 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 824 | | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= | 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= | 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 820 | | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= | 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= | 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 812 | | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= | 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= | 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 808 | | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= | 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= | 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 800 | | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= | 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= | 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 794 | | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= | 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= | 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 782 | | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= | 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= | 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 780 | | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= | 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= | 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 760 | | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= | 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= | 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 749 | | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= | 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= | 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 739 | | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= | 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= | 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 734 | | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= | 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= | 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 702 | | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= | 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= | 100.00000 |

| | | | | | |
|------------------|----|---------|----|---------|--------------|
| BARRA NÚMERO 678 | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 637 | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 243 | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 217 | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 213 | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 209 | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 208 | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 186 | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 172 | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 165 | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 162 | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 98 | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 84 | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 80 | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 53 | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 38 | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 35 | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 9 | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 8 | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 4 | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= 100.00000 |
| BARRA NÚMERO 3 | | | | | |
| PARÂMETROS | A= | 0.00000 | B= | 0.00000 | C= 100.00000 |
| | D= | 0.00000 | E= | 0.00000 | F= 100.00000 |

***** CONDIÇÕES INICIAIS *****

***CONDIÇÕES INICIAIS DAS MÁQUINAS SINCRONAS E OS CONTROLADORES ***
CONDIÇÕES INICIAIS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 176

MODELO MÁQUINA 2

Delta= 1.189 Eq= 0.832 Ef= 1.786 Id=-2.332 Iq= 1.624 Pe= 2.900

DADOS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

Vref= 1.088

Ef= 1.786

Vfl= 0.000

CONDIÇÕES INICIAIS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 174

MODELO MÁQUINA 2

Delta= 1.086 Eq= 0.799 Ef= 1.648 Id=-0.826 Iq= 0.679 Pe= 1.120

DADOS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

Vref= 1.103 Ef= 1.648
Vfl= 0.000

CONDIÇÕES INICIAIS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 101
MODELO MÁQUINA 2

Delta= 0.936 Eq'= 0.953 Ef= 1.421 Id=-1.305 Iq= 1.267 Pe= 1.800

DADOS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

Vref= 1.062 Ef= 1.421
Vfl= 0.000

CONDIÇÕES INICIAIS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 94
MODELO MÁQUINA 2

Delta= 0.794 Eq'= 1.023 Ef= 1.372 Id=-2.242 Iq= 3.685 Pe= 4.520

DADOS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

Vref= 1.094 Ef= 1.372
Vfl= 0.000

CONDIÇÕES INICIAIS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 705
MODELO MÁQUINA 2

Delta= 0.940 Eq'= 0.913 Ef= 1.979 Id=-1.018 Iq= 0.606 Pe= 1.200

DADOS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

Vref= 1.116 Ef= 1.979
Vfl= 0.000

CONDIÇÕES INICIAIS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 706
MODELO MÁQUINA 2

Delta= 1.011 Eq'= 0.903 Ef= 2.118 Id=-1.893 Iq= 1.039 Pe= 2.200

DADOS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

Vref= 1.121 Ef= 2.118
Vfl= 0.000

CONDIÇÕES INICIAIS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 183
MODELO MÁQUINA 2

Delta= 0.759 Eq'= 1.038 Ef= 1.370 Id=-0.659 Iq= 1.007 Pe= 1.260

DADOS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

Vref= 1.094 Ef= 1.370
Vfl= 0.000

CONDIÇÕES INICIAIS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 710
MODELO MÁQUINA 2

Delta= 0.483 Eq'= 1.112 Ef= 1.427 Id=-1.313 Iq= 1.542 Pe= 2.000

DADOS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

Vref= 1.098 Ef= 1.427
Vfl= 0.000

CONDIÇÕES INICIAIS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 569
MODELO MÁQUINA 4

Delta= 0.945 Ed'=-0.344 Eq'= 0.944 Eq'= 0.965

Ef= 1.180 Id=-5.838 Iq=12.916 Pe=14.200

DADOS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

Vref= 1.049 Ef= 1.180
Vfl= 0.000

CONDIÇÕES INICIAIS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 714
MODELO MÁQUINA 4

Delta= 0.890 Ed'=-0.282 Eq'= 0.938 Eq'= 0.954

Ef= 1.068 Id=-2.814 Iq=10.674 Pe=10.800

DADOS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

Vref= 1.036 Ef= 1.068
Vfl= 0.000

CONDIÇÕES INICIAIS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 712
MODELO MÁQUINA 2

Delta= 0.813 Eq'= 1.080 Ef= 1.373 Id=-4.619 Iq= 7.373 Pe= 9.000

DADOS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

Vref= 1.086 Ef= 1.373
Vfl= 0.000

CONDIÇÕES INICIAIS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 1031
MODELO MÁQUINA 1

Delta= 0.061 Eq'= 0.999 Id= 0.374 Iq=60.553 Pe=60.480

CONDIÇÕES INICIAIS MÁQUINA SINCRONA

BARRA NÚMERO 1017
MODELO MÁQUINA 4

Delta= 0.921 Ed'=-0.269 Eq'= 1.044 Eq'= 1.065

Ef= 1.276 Id=-18.258 Iq=31.509 Pe=37.800

DADOS DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

Vref= 1.088 Ef= 1.276
Vfl= 0.000

CONDIÇÕES INICIAIS DE CARGA

| | | | |
|-------------------|--------|----|--------|
| BARRA NÚMERO 1167 | | | |
| A= | 0.000 | B= | 0.000 |
| D= | 0.000 | E= | 0.000 |
| C= | 17.641 | F= | 1.307 |
| BARRA NÚMERO 1036 | | | |
| A= | 0.000 | B= | 0.000 |
| D= | -0.000 | E= | -0.000 |
| C= | 29.752 | F= | -5.780 |
| BARRA NÚMERO 1031 | | | |
| A= | 0.000 | B= | 0.000 |
| D= | -0.000 | E= | -0.000 |
| C= | 48.862 | F= | -2.595 |
| BARRA NÚMERO 826 | | | |
| A= | 0.000 | B= | 0.000 |
| D= | 0.000 | E= | 0.000 |
| C= | 2.107 | F= | 0.754 |
| BARRA NÚMERO 824 | | | |
| A= | 0.000 | B= | 0.000 |
| D= | 0.000 | E= | 0.000 |
| C= | 1.353 | F= | 0.638 |
| BARRA NÚMERO 820 | | | |
| A= | 0.000 | B= | 0.000 |
| D= | 0.000 | E= | 0.000 |
| C= | 5.299 | F= | 0.243 |
| BARRA NÚMERO 812 | | | |
| A= | 0.000 | B= | 0.000 |
| D= | 0.000 | E= | 0.000 |
| C= | 1.596 | F= | 0.343 |
| BARRA NÚMERO 808 | | | |
| A= | 0.000 | B= | 0.000 |
| D= | 0.000 | E= | 0.000 |
| C= | 0.817 | F= | 0.372 |
| BARRA NÚMERO 800 | | | |
| A= | 0.000 | B= | 0.000 |
| D= | 0.000 | E= | 0.000 |
| C= | 0.825 | F= | 0.262 |
| BARRA NÚMERO 794 | | | |
| A= | 0.000 | B= | 0.000 |
| D= | 0.000 | E= | 0.000 |
| C= | 2.248 | F= | 1.397 |
| BARRA NÚMERO 782 | | | |
| A= | 0.000 | B= | 0.000 |
| D= | 0.000 | E= | 0.000 |
| C= | 1.513 | F= | 0.832 |
| BARRA NÚMERO 780 | | | |
| A= | 0.000 | B= | 0.000 |
| D= | 0.000 | E= | 0.000 |
| C= | 0.692 | F= | 0.374 |
| BARRA NÚMERO 760 | | | |
| A= | 0.000 | B= | 0.000 |
| D= | -0.000 | E= | -0.000 |
| C= | 4.005 | F= | -1.429 |
| BARRA NÚMERO 749 | | | |
| A= | 0.000 | B= | 0.000 |
| D= | 0.000 | E= | 0.000 |
| C= | 1.597 | F= | 0.075 |
| BARRA NÚMERO 739 | | | |
| A= | 0.000 | B= | 0.000 |
| D= | 0.000 | E= | 0.000 |
| C= | 3.523 | F= | 1.525 |
| BARRA NÚMERO 734 | | | |
| A= | 0.000 | B= | 0.000 |
| D= | 0.000 | E= | 0.000 |
| C= | 2.675 | F= | 0.673 |
| BARRA NÚMERO 702 | | | |
| A= | -0.000 | B= | -0.000 |
| D= | 0.000 | E= | 0.000 |
| C= | -0.594 | F= | 0.043 |
| BARRA NÚMERO 678 | | | |
| A= | 0.000 | B= | 0.000 |
| D= | 0.000 | E= | 0.000 |
| C= | 0.852 | F= | 0.063 |
| BARRA NÚMERO 637 | | | |
| A= | 0.000 | B= | 0.000 |
| D= | 0.000 | E= | 0.000 |
| C= | 0.779 | F= | 0.285 |
| BARRA NÚMERO 243 | | | |
| A= | 0.000 | B= | 0.000 |
| D= | 0.000 | E= | 0.000 |
| C= | 0.700 | F= | 0.288 |
| BARRA NÚMERO 217 | | | |
| A= | 0.000 | B= | 0.000 |
| D= | 0.000 | E= | 0.000 |
| C= | 0.412 | F= | 0.179 |
| BARRA NÚMERO 213 | | | |
| A= | 0.000 | B= | 0.000 |
| D= | 0.000 | E= | 0.000 |
| C= | 1.169 | F= | 0.348 |
| BARRA NÚMERO 209 | | | |
| A= | 0.000 | B= | 0.000 |
| D= | 0.000 | E= | 0.000 |
| C= | 0.236 | F= | 0.099 |
| BARRA NÚMERO 208 | | | |
| A= | 0.000 | B= | 0.000 |
| D= | 0.000 | E= | 0.000 |
| C= | 0.330 | F= | 0.143 |
| BARRA NÚMERO 186 | | | |
| A= | 0.000 | B= | 0.000 |
| D= | 0.000 | E= | 0.000 |
| C= | 0.766 | F= | 0.356 |
| BARRA NÚMERO 172 | | | |
| A= | 0.000 | B= | 0.000 |
| D= | 0.000 | E= | 0.000 |
| C= | 0.824 | F= | 0.292 |

BARRA NÚMERO 165

A= 0.000 B= 0.000 C= 0.176
D= 0.000 E= 0.000 F= 0.082

BARRA NÚMERO 162

A= 0.000 B= 0.000 C= 0.629
D= -0.000 E= -0.000 F= -0.075

BARRA NÚMERO 98

A= 0.000 B= 0.000 C= 0.569
D= 0.000 E= 0.000 F= 0.229

BARRA NÚMERO 84

A= 0.000 B= 0.000 C= 4.828
D= 0.000 E= 0.000 F= 0.855

BARRA NÚMERO 80

A= 0.000 B= 0.000 C= 3.753
D= 0.000 E= 0.000 F= 1.072

BARRA NÚMERO 53

A= 0.000 B= 0.000 C= 0.655
D= 0.000 E= 0.000 F= 0.335

BARRA NÚMERO 38

A= 0.000 B= 0.000 C= 0.447
D= 0.000 E= 0.000 F= 0.212

BARRA NÚMERO 35

A= 0.000 B= 0.000 C= 0.319
D= 0.000 E= 0.000 F= 0.130

BARRA NÚMERO 9

A= 0.000 B= 0.000 C= 0.285
D= 0.000 E= 0.000 F= 0.096

BARRA NÚMERO 8

A= 0.000 B= 0.000 C= 0.202
D= 0.000 E= 0.000 F= 0.050

BARRA NÚMERO 4

A= 0.000 B= 0.000 C= 0.514
D= 0.000 E= 0.000 F= 0.176

BARRA NÚMERO 3

A= 0.000 B= 0.000 C= 1.092
D= -0.000 E= -0.000 F= -0.138

Apêndice B

Este anexo descreve a parte de implementação computacional executada neste trabalho.

Com o objetivo de se obter equivalentes dinâmicos e realizar a análise dos modelos reduzidos, foram desenvolvidos uma série de programas computacionais, que servem tanto para aplicação de identificação/redução de sistemas de potência quanto para identificação/redução de sistemas físicos gerais.

Estes programas foram implementados usando linguagem Fortran. Foram utilizadas as bibliotecas matemáticas LINPACK e EISPACK para a elaboração dos algoritmos utilizados nos programas.

O pacote computacional desenvolvido para identificação/redução de ordem de sistemas é composto pelos seguintes programas:

- PRONY
- HAN
- FORE

Estes programas são de fácil utilização, sendo suas funções de entrada/saída descritas abaixo, e apresentadas com maiores detalhes nos manuais dos programas.

Este pacote computacional encontra-se disponível para uso no Labspot (Laboratório de Sistemas de Potência), estando disponíveis em versões para microcomputador IBM-PC compatíveis 386 ou superiores, e para estações de trabalho "SUN".

I. Programa principal - PRONY

O programa principal PRONY permite a identificação e redução da função de transferência de um sistema dinâmico, executando o algoritmo descrito na seção 3.2 (Capítulo 3), e é composto das seguintes etapas:

1.) Leitura dos seguintes dados:

NOME: o nome do arquivo que contem as amostras, cuja extensão deve ser ".out".

k1 : ordem da função de transferência desejada.

al1 : autovalor complexo λ_{n+1} (REF.: eq. 3.22)

np : número de constantes c_i 's usadas no sinal de entrada (REF.: eq. 3.22)

p1 : máquina a ser analisada

deltat : intervalo de tempo desejado de espaçamento entre as amostras.

c1 e d1 : constantes c_i 's e tempos D_i 's do sinal de entrada (REF.: eq. 3.22)

Todos estes dados são lidos em um único arquivo denominado "Prony.dat".

2.) Execução do algoritmo via Prony, descrito no capítulo 3

3.) Saída da função de transferência, representada na forma de pólos e resíduos.

Este programa utiliza varias rotinas das bibliotecas Linpack e Eispack.

II. Programa principal - HAN

O programa principal HAN permite a redução de ordem de um sistema dinâmico, executando os algoritmos de Moore e da Mínima Norma de Hankel descritos na seção 3.3 (capítulo 3), e é composto das seguintes etapas:

1.) Leitura de dados:

Os dados são lidos de um arquivo cujo nome é declarado pelo usuário.

Este arquivo deve ter extensão ".dad", e contem os seguintes dados :

| | |
|----|---------------------------------------|
| m | : dimensão do sistema original. |
| ne | : número de entradas. |
| ns | : número de saídas. |
| k | : ordem desejada do sistema reduzido. |

2.) Execução do algoritmo de Moore e da mínima norma de Hankel, descritos no capítulo 3

3.) Saída do sistema balanceado reduzido pelo método de Moore, e saída do sistema reduzido pelo método da mínima norma de Hankel.

Este programa utiliza varias rotinas das bibliotecas Linpack e Eispack.

III Programa principal - FORE

O programa principal FORE permite a identificação e redução da função de transferência de um sistema dinâmico, executando o algoritmo descrito na seção 3.4 (capítulo 3), e é composto das seguintes etapas:

1.) Leitura de dados:

Os dados são lidos de um arquivo cujo nome é declarado pelo usuário. Este arquivo deve ter extensão ".out", e conter os seguintes dados :

- wk1 : amostras da frequência.
- r1 : parte real da magnitude para as diferentes amostras de frequência.
- o1 : parte imaginária da magnitude para as diferentes amostras de frequência.
- k : ordem desejada da função de transferência identificada.

2.) Execução do algoritmo de Levy, descrito no capítulo 3

3.) Saída da função de transferência, representada pelos coeficientes do numerador e denominador respectivamente, em forma descendente.

Este programa utiliza varias rotinas das librerías Linpack e Eispack.